

Theresa Christine Sommerfeld

Strahlenexposition des Personals
bei der Skelettszintigrafie mit
Technetium-99m-Diphosphonat
beim Pferd



Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Grades eines
Dr. med. vet.

beim Fachbereich Veterinärmedizin der Justus-Liebig-Universität Gießen



édition scientifique 
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt.

Die rechtliche Verantwortung für den gesamten Inhalt dieses Buches liegt ausschließlich bei den Autoren dieses Werkes.

Jede Verwertung ist ohne schriftliche Zustimmung der Autoren oder des Verlages unzulässig. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in und Verarbeitung durch elektronische Systeme.

1. Auflage 2016

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the Authors or the Publisher.

1st Edition 2016

© 2016 by VVB LAUFERSWEILER VERLAG, Giessen
Printed in Germany



édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

STAUFENBERGRING 15, D-35396 GIESSEN
Tel: 0641-5599888 Fax: 0641-5599890
email: redaktion@doktorverlag.de

www.doktorverlag.de

Aus der Klinik für Pferde (Chirurgie) mit Lehrschmiede des Fachbereichs
Veterinärmedizin der Justus-Liebig-Universität Gießen

Betreuer: Prof. Dr. L.- F. Litzke und Prof. Dr. Dr. R. Bauer

Strahlenexposition des Personals bei der Skelettszintigrafie mit Technetium-99m-Diphosphonat beim Pferd

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines
Dr. med. vet.
beim Fachbereich Veterinärmedizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen

eingereicht von

Theresa Christine Sommerfeld

Tierärztin aus Tübingen

Gießen 2016

Mit Genehmigung des Fachbereiches Veterinärmedizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen

Dekan: Prof. Dr. Dr. h.c. M. Kramer

1. Gutachter: Prof. Dr. L. Litzke

2. Gutachter: Prof. Dr. Dr. R. Bauer

Prüfer: PD Dr. M. Schneider

Tag der Disputation: 11.07.2016

Meinen Eltern gewidmet

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Literaturübersicht	3
2.1	Grundlagen Strahlenphysik	3
2.1.1	Eigenschaften und Entstehung ionisierender Strahlung	3
2.3	Skelettszintigrafie.....	5
2.3.1	Grundlagen	5
2.3.2	Gammakamera	6
2.3.3	Radiopharmakon.....	8
2.3.4	Geschichte	9
2.3.5	Durchführung einer Szintigrafie.....	10
2.5	Dosimetrie.....	13
2.5.1	Rechtliche Grundlagen für beruflich strahlenexponierte Personen.....	13
2.5.2	Dosismessgrößen	15
2.5.2.2	Energiedosis D	16
2.5.2.3	Äquivalentdosis H.....	16
2.5.2.3	Effektive Dosis H_{eff}	17
2.5.2.4	Körperdosis	18
2.5.3	Personendosimetrie	19
2.5.3.1	Ionisationskammerdosimeter	19
2.5.3.2	Filmdosimeter	19
2.5.3.3	Thermolumineszenz- Dosimeter	20
2.6	Strahlenschutz.....	20
2.7	Strahlenexposition	22
2.7.1	Natürliche Strahlenexposition	22
2.7.3	Berufliche Strahlenexposition des veterinärmedizinischen Personals	24
2.7.4	Biologische Strahlenfolgen.....	24
3	Eigene Untersuchungen.....	29
3.1	Material	29
3.1.1	Dosimetrierte Personen	29
3.1.2	Dosimetrierte Patienten.....	31
3.1.3	Dosimeter	32

Inhaltsverzeichnis

3.1.4	Gammakamera	33
3.1.5	Radiopharmakon	35
3.1.6	Bleischürzen	35
3.2	Methode	36
3.2.1	Messmethodik	36
3.2.2	Normierung der Werte auf 10 MBq/kg Körpergewicht (KG)	39
3.2.3	Berechnung des Referenzvolumens	39
3.2.4	Umfrage zum Thema Strahlenexposition in der veterinärmedizinischen Skelettszintigrafie beim Pferd	40
3.2.5	Statistische und graphische Auswertung	41
3.3	Ergebnisse	42
3.3.1	Auswertung MP1	42
3.3.2	Auswertung Zeitdauer	42
3.3.3	Auswertung MP2 und MP3	43
3.3.4	Auswertung MP4	45
3.3.5	Auswertung MP 5 und MP6	47
3.3.6	Auswertung MP7	51
3.3.7	Vergleiche MP 2 mit MP3	53
3.3.8	Vergleich mit und ohne Schürze an MP1, MP2 und MP4	55
3.3.9	Prüfung auf Korrelation zwischen DL2 und DL5 und der Körperkonstitution der Patienten mit den Parametern Gewicht, Kaliber und Referenzvolumen	57
3.3.10	Die Ergebnisse der eigenen Umfrage	58
4	Diskussion	62
4.1	Intention der Untersuchung	62
4.2	Normierungen der Ergebnisse der Dosismessungen für den Vergleich	63
4.3	Messgenauigkeit	64
4.4	Interpretation Ergebnisse für MP1-4	65
4.5	Höhe der applizierten Aktivität	71
4.6	Interpretation der Ergebnisse für MP5, MP6 und MP7	72
4.7	Vergleich mit Daten aus der Literatur	73
4.8	Berechnung der effektiven Halbwertszeiten von Tc99m-Diphosphonat	75

4.9	Dosis des Pflegepersonals, Freigabe der Einstreu, Entlassung des Patienten und Aufhebung des temporären Kontrollbereichs	76
4.9.1	Dosis Pfleger	76
4.9.2	Freigabe der Einstreu	77
4.9.3	Temporärer Kontrollbereich	77
4.9.4	Entlassung der Patienten	78
4.10	Dosis in Abhängigkeit von Kaliber, Gewicht und Referenzvolumen	79
4.11	Interpretation der Messungen mit und ohne Bleischürze	80
4.12	Interpretation der Umfrage-Ergebnisse	83
4.13	Fazit	85
5	Zusammenfassung	87
6	Summary	89
7	Literaturverzeichnis	92
8	Anhang	100
8.1	Tabellen-Verzeichnis	100
8.2	Abbildungs-Verzeichnis	102
8.3	Einzeldaten der szintigrafischen Untersuchung	103
8.4	Template der Umfrage	119
9	Danksagung	123
10	Selbständigkeitserklärung	124

Abkürzungsverzeichnis

A	Aktivität
ALARA	„as low as reasonably achievable“
BEIR	Biological Effects of Ionizing Radiation
CT	Computertomographie
D	Energiedosis
DL	Dosisleistung
DZ	Dosiszuwachs
DNA	Desoxyribonucleic Acid
DNS	Desoxyribonukleinsäure
GBq	Giga-Becquerel
GKS	Ganzkörperszintigrafie
Gy	Gray
H	Äquivalentdosis
H _{eff.}	effektive Dosis
HDP	Hydroxymethylendiphosphonat
HWZ	Halbwertszeit
ICRP	International Commission on Radiological Protection
J	Joule
kBq	Kilobecquerel
keV	Kiloelektronenvolt
Kat	Kategorie
KG	Körpergewicht
LNT	Linear No Threshold
MBq	Mega-Becquerel
MDP	Methylendiphosphonat
MeV	Mega-Elektronenvolt
Mo99	Molibdän-99
MRT	Magnetresonanztomographie
mSv	Millisievert
μGy	Mikrogray
μSv	Mikrosievert
NaJ	Natriumjodid

Abkürzungsverzeichnis

pi	post injectionem
PMT	Photomultiplier, Photoelektronenvervielfacher
P-32	Phosphor-32
Ref-V	Referenzvolumen
RNA	Radionuklidangiogramm
RöV	Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen
Ru99	Ruthenium-99
StrlSchV	Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen
Sv	Sievert
Tc-DTPA	Technetium-99m-Diethylenetriaminepentacetat
Tc99m	Technetium-99 metastabil
TKS	Teilkörperszintigrafie
UNSCEAR	“United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation”
w _R	Strahlenwichtungsfaktor
w _T	Gewebewichtungsfaktor

1 Einleitung

Die Skelettszintigrafie stellt in der Veterinärmedizin seit vielen Jahren ein zunehmend wichtiges Verfahren in der Diagnostik von Lahmheiten bei Pferden dar. Es handelt sich um ein nuklearmedizinisches Verfahren, welches die bildliche Darstellung des Knochenmetabolismus ermöglicht.

Es bietet eine nicht invasive und sehr sensitive Methode zur Detektion akuter und chronischer Schäden im Knochenapparat. Im Vergleich zum Röntgen bietet die Szintigrafie eine bildgebende diagnostische Möglichkeit mit sehr hoher Sensitivität, jedoch geringer Spezifität (Martinelli und Chambers 1995). Je nach Art des Knochens lassen sich schon nach 12 bis 48 Stunden Veränderungen im Knochenmetabolismus sicher darstellen. Die Rate der Falsch-Negativen Ergebnisse ist dabei sehr gering (Huchzermeyer 2015).

In der Humanmedizin findet die Skelettszintigrafie hauptsächlich Einsatz zum Nachweis oder Ausschluss von Knochenmetastasen oder primären Knochentumoren, sowie zur Diagnostik von degenerativen und entzündlichen Veränderungen des Skelettsystems (Römer 2010).

Bei dem verabreichten Radiodiagnostikum handelt es sich in den meisten Fällen um das Radionuklid Technetium 99m (Tc^{99m}), das an ein Diphosphonat gebunden ist und sich als osteotroper Tracer in der Nuklearmedizin bewährt hat. Durch seine relativ kurze Halbwertszeit von 6 Stunden (exakt 6,01 h) und seiner Energie von 140 keV, wird es heute in den meisten Fällen in der Szintigrafie angewendet (Warren-Forward et al. 2007). Die markierten Phosphonate werden von Hydroxylapatit der mineralischen Knochenmatrix adsorbiert. An Stellen mit aktiven Stoffwechselprozessen findet durch die vorherrschende Osteoblastenaktivität eine Mehrbelegung an der mineralischen Matrix des Knochens statt, welche in Form von Hotspots im aufgenommenen Bild sichtbar werden.

Da der Mensch keine Sinnesorgane für die Wahrnehmung von ionisierender Strahlung besitzt, ist der Strahlenschutz bei Tätigkeiten mit ionisierender Strahlung wichtig. In der Humanmedizin gibt es vielerlei Aufzeichnungen über die kumulierte Personendosis pro Szintigrafie und pro Jahr (Bayram et al. 2011; Smart 2004; Harding et al. 1984). Die

Ergebnisse zeigen, dass die höchste Strahlungsexposition während der Aufnahme der Bilder und nicht während des Handlings mit dem Radiopharmazeutikum zu erwarten ist.

Obwohl sich die Szintigrafie beim Pferd in der Vergangenheit wachsender Beliebtheit erfreute, blieben aktuelle und praxisnahe Studien bezüglich der Expositionsraten für beteiligtes Personal aus. Zwar wurden auch in der Veterinärmedizin in der Vergangenheit von mehreren Autoren Überlegungen und Messungen zum Thema Strahlenexposition in der Nuklearmedizin vorgenommen, jedoch wurden viele Schritte und Expositionspositionen nicht mit berücksichtigt (Whitelock 1997; Gatherer et al. 2007; Steyn und Uhrig 2005; Baixeras et al. 2004). Diverse Autoren verglichen zudem die Wirkung einer Bleischürze und kamen zu dem Ergebnis, dass ein hoher dosisreduzierender Faktor ein starkes Argument für die Bleischürze darstellt (Steyn und Uhrig 2005; Neuwirth und Romine 2000; Pilsworth und Webbon 1988; Dyson 2003; Auer und Stick 2012; Bayram et al. 2011). Da heute in vielen Kliniken nach wie vor ohne Bleischürze gearbeitet wird (eigene Umfrage 2015) und die genauen Expositionswerte für einzelne Arbeitsschritte während equiner Skelettszintigrafien wie dem Aufbereiten der Radioaktivität, dem Injektionsvorgang und die jeweiligen Positionen am Pferd nicht genauer identifiziert sind, wurde anhand dieser Dissertation eine genaue Aufarbeitung jener genannten Arbeitspositionen und ihrer damit verbundenen Strahlenexposition vorgenommen.

2 Literaturübersicht

2.1 Grundlagen Strahlenphysik

2.1.1 Eigenschaften und Entstehung ionisierender Strahlung

Bei dem Zerfall von radioaktiven Kernen werden Alpha-, Beta und Gammastrahlung unterschieden. Zudem zählen die Röntgenstrahlen ebenfalls zur ionisierenden Strahlung.

Strahlung transportiert Energie in Form elektromagnetischer Wellen oder als Teilchenstrom. Diese Energie kann Elektronen aus Atomen oder Molekülen „herausschlagen“. Das zurückbleibende Atom oder Molekül ist dadurch ionisiert und somit positiv geladen. Trifft Strahlung auf Gewebe, kann Sie durch Veränderungen (Ionisationsvorgänge) an Molekülen Zellschäden zur Folge haben.

Beim alpha-Zerfall sendet der Kern einen Helium-Atomkern aus, der aus 2 Protonen und 2 Neutronen besteht. Alpha-Strahlung besitzt eine geringe Reichweite bei gleichzeitig hoher ionisierender Wirkung (Wechselwirkung mit Materie). Sie kann durch ein Blatt Papier abgebremst werden. Wird ein Alphastrahler ingestiert, kann er im Körper lokal großen Schaden anrichten.

Beim Beta-Zerfall sendet der Kern ein Elektron oder Positron aus und zusätzlich elektromagnetische Strahlung in Form von Gammastrahlung. Er wird untergliedert in β^+ -Zerfall und β^- -Zerfall. Beim β^+ -Zerfall wandelt ein radioaktives Element mit Protonenüberschuss ein Proton in ein Neutron um, somit fällt die Ordnungszahl um 1. Beim β^- -Zerfall wandelt sich ein Neutron in ein Proton und ein Elektron um. Die Massezahl bleibt gleich, die Kernladungszahl steigt somit um 1. β -Strahlen haben eine größere Reichweite in Luft als Alphastrahlen, können aber durch einige cm Plexiglas abgeschirmt werden.

Beim Gammazerfall wird elektromagnetische Strahlung emittiert. Von angeregten Atomkernen (Tochteratom eines Alpha- oder Beta-Zerfalls bzw. durch Neutroneneinfang oder andere Kernreaktionen angeregt) werden ungeladene Photonen oder „Quanten“ ausgesendet, welche Material im Vergleich zu Alpha- und Betastrahlung sehr gut durchdringen können, da sie weniger Wechselwirkung mit der Materie eingehen. Röntgenstrahlen, die ebenfalls im Verlauf eines radioaktiven Zerfalls

auftreten können, sind ebenfalls elektromagnetische Strahlen, die aber beim Übergang von Elektronen in der Atomhülle entstehen.

Gamma- und Röntgenstrahlung werden als indirekt ionisierende Strahlung bezeichnet, da sie aus ungeladenen Teilchen bestehen (Photonen) und erst über die Auslösung eines geladenen Sekundärteilchens ionisieren (Roth 2008). Röntgenstrahlung entsteht entweder durch Abbremsen von Elektronen in der Atomhülle (Kauffmann et al. 2013) oder wenn ein Atom nach Anregung einer Elektronenschale unter Abgabe eines Photons einen niedrigeren Energiezustand erreicht. Die Wechselwirkung von Photonen mit Materie findet durch elementare Wechselwirkungsprozesse statt, nämlich Photo- und Comptoneffekt sowie Paarbildung (Krieger 2007).

Energiereiche, indirekt ionisierende Strahlung überträgt beim Durchgang von Materie ihre Energie auf das Gewebe und geht auf verschiedene Weisen Wechselwirkungen mit der Materie ein. Trifft das Photon auf ein Hüllenelektron, kann die Energie entweder vollständig (Photoeffekt) oder nur teilweise (Comptoneffekt) übertragen werden. Beim Photoeffekt entsteht das sog. Photoelektron. Beim Comptoneffekt entsteht das ionisierende Comptonelektron und ein weniger energetisches Photon, das als sog. Streustrahlung bezeichnet wird. Ob Photo- oder Comptoneffekt auftreten, hängt unter anderem von dem Energiespektrum der eintreffenden Strahlung und der Ordnungszahl der bestrahlten Materie ab. Je geringer die Energie ist, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Comptoneffekt auftritt.

Es wird zwischen einer physikalischen Halbwertszeit (HWZ) und einer biologischen HWZ unterschieden. Die physikalische HWZ beschreibt die Zeit, nach der die Hälfte des Radionuklids zerfallen ist. Die biologische HWZ hingegen beschreibt die Zeit, nach der die Hälfte des Tracers aus dem Organismus eliminiert ist.

2.3 Skelettszintigrafie

2.3.1 Grundlagen

Bei der Szintigrafie handelt es sich um ein bildgebendes Verfahren der nuklearmedizinischen Diagnostik. In der Humanmedizin werden nuklearmedizinische Untersuchungen schon seit etwa 1940 eingesetzt. In der Veterinärmedizin wurde die Skelettszintigraphie seit 1975 als diagnostisches Hilfsmittel zur Detektion von Frakturen und andere Knochentraumata eingesetzt (Lloyd et al. 1988; Stover et al. 1986; Markel et al. 1987; Pilsworth und Webbon 1988). Das am meiste eingesetzte Radionuklid ist Tc99m. Es hat den großen Vorteil, dass es aus einem sog. Molybdän-Technetium-Generator eluiert werden kann und somit täglich in der Routine verfügbar ist. Das gewonnene Eluat wird einem „Kit“ mit einem Phosphonat zugesetzt, woraus innerhalb weniger Minuten das fertige Radiodiagnostikum entsteht, das die gewünscht hohe Affinität zu Knochengewebe aufweist. Dieser Arbeitsschritt findet hinter einer Bleiburg statt und dauert nur wenige Minuten. Das injektionsfertige Radiopharmakon wird intravenös verabreicht und reichert sich je nach Knochenstoffwechselaktivität innerhalb von Minuten bis Stunden an der Knochenmatrix an.

Üblicherweise wird mit der Szintigrafie 2 Stunden nach Injektion begonnen, wenn die Aktivität zum großen Teil aus dem Weichteilgewebe eliminiert ist. Anschließend wird die vom Körper des Patienten abgegebene Strahlung mit Hilfe einer Gammakamera aufgezeichnet und anhand eines Computersystems in Form eines Bildes auf dem Monitor sichtbar gemacht. Im Vergleich zu anderen bildgebenden Diagnostika wie Röntgen, Magnetresonanztomografie (MRT), Computertomografie (CT) oder Ultraschall, werden bei der Szintigrafie nicht die strukturellen Veränderungen, sondern funktionelle Veränderungen der Organsysteme untersucht. Szintigrafische Bilder reflektieren mehr die physiologische Funktion des Gewebes, als ihre anatomische Struktur (Weaver 1995). Es handelt sich um eine sehr sensitive, dafür aber wenig spezifische Methode (Devous und Twardock A 1984.; Martinelli und Chambers 1995), welche zur Früherkennung von Krankheiten des Knochens genutzt werden kann. Eine eindeutige Befundung ohne andere bildgebende Diagnostika ist deswegen oft nicht möglich, da zwar eine hochsensitive Detektion des Gewebemetabolismus möglich ist, aber dessen Ursache unterschiedliche Genese haben kann. Zur endgültigen

Diagnosestellung muss meistens eine anatomische Darstellung mithilfe anderer bildgebender Diagnostik erfolgen.

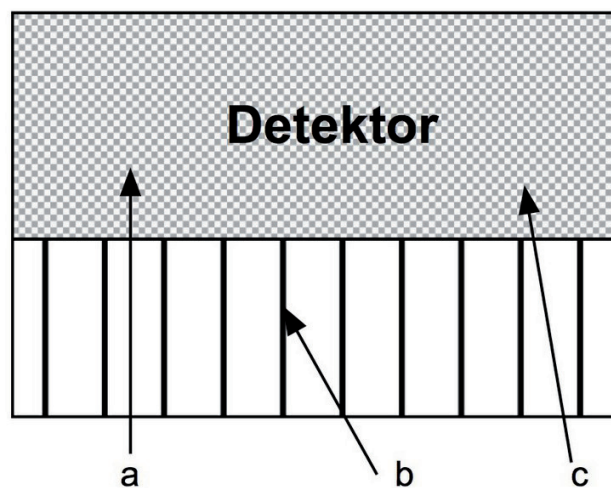
In der Humanmedizin ist die häufigste nuklearmedizinische Diagnostik die Schilddrüsenszintigrafie, die Skelettszintigrafie steht „nur“ an zweithäufigster Stelle. Die Dosis bei der Skelettszintigrafie ist etwa 10-fach so hoch wie bei Ersterer (Strahlenschutzkommission 1998). In der Veterinärmedizin wird die Schilddrüsenszintigrafie vor allem bei Katzen zur Abklärung autonomer Adenome verwandt, während beim Pferd im Wesentlichen die Skelettszintigrafie zur orthopädischen Diagnostik von Lahmheiten eingesetzt wird (Daniel et al. 2012; Parker et al. 2010; Winter et al. 2010; Simon und Dyson 2012; Archer et al. 2007; Dyson et al. 2006). Der Hauptteil der Kliniken in Deutschland gab als einen der Hauptgründe für szintigrafische Untersuchungen Lahmheiten der Hintergliedmaße mit Verdacht auf Beteiligung des Rückens und der Hüfte an (eigene Umfrage 2015).

Die Vorteile der Szintigrafie sind unter anderem die gute Durchführbarkeit am stehenden Patienten, keine Notwendigkeit das Pferd vor der Untersuchung nüchtern zu stellen, die Möglichkeit zur Ganzkörper-Diagnostik und die hohe Sensitivität des Systems, sowie eine schnelle Elimination über die Blase. Eine nach ICRP berechnete biologische Halbwertszeit ergibt nach 4 h eine Restaktivität von 29% im Körper (ICRP Publication 53 2014). Mögliche Nachteile sind die relativ geringe Spezifität, lange Aufnahmezeiten pro Bild, die damit verbundene Gefahr von Bewegungsunschärfe und die Strahlenexposition des Personals durch Einsatz eines radioaktiven Materials.

2.3.2 Gammakamera

Die im Jahre 1958 durch Hal Anger erfundene Gammaszintillationskamera wurde entwickelt, um die Verteilung einer inkorporierten radioaktiven Verbindung im Körper der Patienten zu untersuchen. Eine Gammakamera besteht aus einem Kollimator, dem Natriumjodid-Kristall (NaJ) und einem Array von Fotomultipliern (PMT). Der Kollimator ist eine Bleiplatte mit parallelen Löchern, die durch möglichst dünne „Septen“ voneinander getrennt sind. Damit lässt der Kollimator im Wesentlichen nur Strahlung durchtreten, die senkrecht auf seine Oberfläche einfallen. Die durchtretenden Gammaquanten übertragen Energie auf Moleküle in dem NaJ-Kristall. Ein Teil der

absorbierten Energie wird in Lichtquanten umgewandelt. Die Zahl der Lichtquanten ist proportional zur Energie der Gammaquanten. Diese Lichtemissionen werden über einen Lichtleiter an die Kathoden mehrere Fotomultipliern geleitet und dort in ein elektrisches Signal umgewandelt. Über mehrere Dioden wird dieses Signal in den PMT's um $10^6 - 10^8$ verstärkt (Twardock in Dyson 2003) und steht damit als elektrisches Signal zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung. Analog-zu-Digital-Wandler digitalisieren die Signale für eine rechnergestützte Weiterverarbeitung. Werden die Gammaquanten im Gewebe des Patienten gestreut, verlieren sie Energie. In dem „Impulshöhenanalysator“ der Gammakamera werden diese Quanten eliminiert, wodurch die Bildqualität verbessert wird. Der in der Szintigrafie eingesetzte Kollimator muss an die Energie des verwendeten Radionuklids angepasst sein.



*Abb. 1: Darstellung eines Kollimators mit Anordnung der Septen
(Beschreibung im Text)*

Wird eine höherenergetische Strahlung (z.B. 364 keV bei Jod-131) gemessen, müssen die Septen sehr viel dicker sein, damit vermieden wird, dass schräg auf den Kollimator eintreffende Strahlung die Septen penetriert und damit die Bildqualität beeinträchtigt. Wegen der dickeren Septen ist allerdings die Auflösung reduziert. Bei Verwendung von Tc99m können Kollimatoren mit geringer Septendicke verwendet werden, wodurch die Auflösung gesteigert ist. Die System-Auflösung einer Gammakamera mit einem für Tc99m optimierten Kollimator beträgt ca. 4 mm. Da ein Parallelloch-Kollimator aber nicht nur exakt senkrecht auftreffende Strahlung durchlässt (Strahl „a“ in Abb. 1),

sondern auch Strahlung, die unter einem leichten Winkel zur Senkrechten einfällt (Strahl „c“), ist die „Systemauflösung“ je nach Abstand des Patienten von der Kollimatoroberfläche geringer und beträgt etwa 5 bis 8 mm (die Strahlung „b“, die auf ein Septum trifft, wird absorbiert).

2.3.3 Radiopharmakon

Das am häufigste eingesetzte Radiopharmakon in der Skelettszintigrafie ist ein mit Tc99m markiertes Phosphonat. Gewonnen wird Tc99m aus dem Zerfall des langlebigen Mutternuklids Molybdän-99 (Mo99), das mit einer HWZ von 66 Stunden unter Abgabe von Betastrahlung in Tc99m und zu Teilen in Tc99 zerfällt. Durch Auswaschen mit physiologischer Kochsalzlösung wird das „Tochternuklid“ Technetium von dem „Mutternuklid“ Molybdän getrennt, dieser Vorgang heißt „Elution“. Wie im Zerfallsschema in Abb. 2 dargestellt ist, zerfällt Mo-99 zum überwiegenden Teil in Tc99m. Das „m“ bedeutet „metastabil“, weil dieses Radionuklid mit einer HWZ von 6 h durch Gammaemission in den „Grundzustand“ von Tc99 zerfällt. Tc99 wird im medizinischen Gebrauch als „stabil“ bezeichnet, was nicht ganz korrekt ist. Mit einer allerdings sehr langen HWZ von 211.100 Jahren zerfällt es durch Betazerfall in das stabile Ruthenium-99 (Ru99) (vgl. Abb. 2).

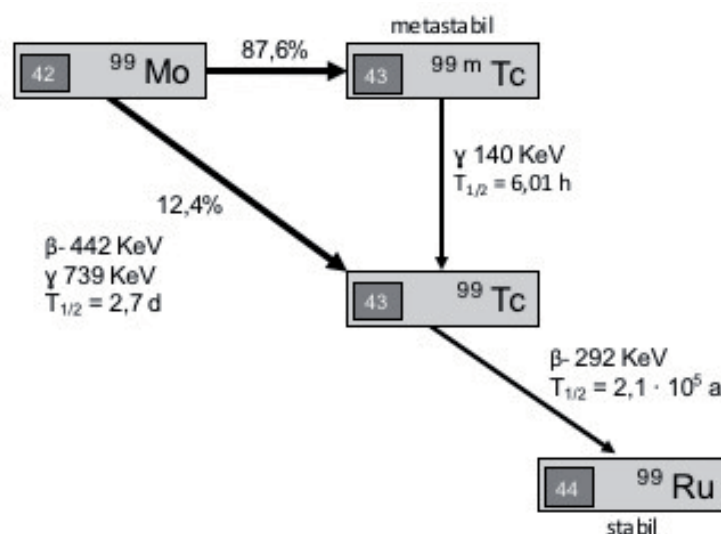


Abb. 2: Zerfallsschema Mo99 zu Ru99

Aufgrund der für szintigrafische Untersuchungen günstigen HWZ von 6 h, der niedrigen Energie von 140 KeV, einer guten Verfügbarkeit und der relativ günstigen Herstellung, findet Tc99m in der Szintigrafie gekoppelt an einen Liganden als Radiopharmakon Anwendung. In der Skelettszintigrafie wird häufig Hydroxymethyldiphosphonat (HDP) bzw. Methyldiphosphonat (MDP) als Tracer eingesetzt. Dafür finden Markierungskits Anwendung. Markierungskits enthalten in der Regel einen Komplexbildner, ein Reduktionsmittel, Puffersubstanzen und Stabilisatoren. Nach Hinzufügen des Eluates (Tc99m-Pertechnetat) entsteht Tc99m-Oxidronat, ein injizierbares Arzneimittel für Diagnostikzwecke. Nach Injektion reichert sich diese Verbindung v.a. im Knochen an.

2.3.4 Geschichte

Bereits im Jahre 1896 entdeckte Henri Antoine Becquerel anhand eines Zufalls die Eigenstrahlung von Uran und somit die Radioaktivität. Ursprünglich untersuchte er die Phosphoreszenzspektren einzelner Minerale und unternahm diverse Versuche mit Fotoplatten. Die bahnbrechende Entdeckung machte Becquerel, als er feststellte, dass Uran ohne jegliche Einwirkung von Sonnenlicht eine Fotoplatte zu schwärzen vermochte. Zusammen mit den Eheleuten Curie forschte er weiter auf dem Gebiet der Radioaktivität. Im Jahre 1903 erhielten Becquerel und die Eheleute Curie gemeinsam den Nobelpreis für Physik.

Bereits 40 Jahre nach Entdeckung durch Becquerel wurde die erste Therapie mit künstlichen Radionukliden durch John Lawrence an einem Patienten mit Leukämie durchgeführt. Er setzte dafür den β -Strahler Phosphor (P-32) ein. Zwei Jahre später, im Jahre 1938, gelang die Herstellung des nicht natürlichen radioaktiven Isotops Tc99m durch Glenn Seaborg und Emilio Segré (Schicha et al. 2007).

In den 40-er Jahren wurden nuklearmedizinische Verfahren in der Diagnostik in der Humanmedizin eingesetzt. Im Jahre 1951 veröffentlichte Emil Graul erste klinische Publikationen in Deutschland zur nuklearmedizinischen Diagnostik. Im Jahre 1958 entwickelte der Amerikaner Hal Anger die Gammakamera. Es dauerte ca. weitere 20 Jahre, bis die Szintigrafie erstmals durch den Schweizer Gottlieb Ueltschi im Jahre 1962 als diagnostisches Verfahren in der Pferdemedizin eingesetzt wurde (Weaver

1995). „Die Skelettszintigrafie mit Tc99m markierten Phosphonaten ist in der Humanmedizin die wichtigste Untersuchungsmethode zur Früherfassung von radiologisch und klinisch verborgenen Knochenläsionen“ (Ueltschi 1977). Der Autor verwies somit vor allem auf das Potential der Nuklearmedizin, röntgenologisch unerkannte Läsionen detektieren zu können und übertrug die Technik aus der Humanmedizin auf die Veterinärmedizin. Die Anfänge beschränkten sich auf die Erkennung von Knochentraumata, insbesondere von Frakturen (Pilsworth und Webbon 1988; MacKey et al. 1987). Im Jahre 1982 beschrieb Theodorakis eine erfolgreiche Leberszintigrafie beim Pony mit Tc99m- Ethylendiamin-Verbindungen (Theodorakis et al. 1982). Nur 5 Jahre später beschrieben O’Callaghan et al. die Lungenszintigrafie beim Pferd mit Tc99m-Diethylenetriaminepentacetat (Tc-DTPA) als klinisch praktikable Methode zur Abklärung von Lungenerkrankungen beim Pferd (O’Callaghan et al. 1987). Beide Methoden fanden in der Vergangenheit dennoch nur wenig Anwendung und sind bis heute nicht standardmäßig in der Pferdemedizin etabliert.

2.3.5 Durchführung einer Szintigrafie

Nach vorheriger Lahmheitsuntersuchung wird das Pferd am Tage der Szintigrafie vor der Injektion an der Longe bewegt, um eine verbesserte Anreicherung des Tracers am Knochen zu schaffen (Dyson 2014; Huchzermeyer 2015). Dyson beschreibt zusätzlich das „Cold-Limb-Syndrom“, welches an der distalen Gliedmaße vorkommt. Durch Vasokonstriktion kann darunter die Bildqualität leiden. Zusätzlich kann das Pferd eingedeckt werden, um die Körpertemperatur zu erhöhen und die Beine können mit Bandagen abgedeckt werden, um eine lokale Vasodilatation zu erzielen.

Dem Pferd wird ein Venenkatheter eingelegt, um eine schnelle und sichere Applikation in die Vene zu ermöglichen (Dyson 2003). Die Beine werden mit wasserundurchlässigem Material abgedeckt, um eine Kontamination mit Urin zu vermeiden (Huchzermeyer 2015).

Das Radiopharmakon wird aufbereitet und mit einer Aktivität zwischen 1.5 und 5 GBq/Pferd (Whitelock 1997; Attenburrow et al. 1984; Pilsworth und Webbon 1988) bzw. 8 MBq/kg KG (Ueltschi 1977; Devous und Twardock 1984.; Whitelock 1997) oder 10 MBq/kg KG (Dyson 2003; Gatherer et al. 2007) injiziert.

Die Knochenszintigrafie wird in drei Phasen untergliedert:

1.) Pool-Phase:

Die Gefäß-Phase, Phase 1 oder auch „Pool-Phase“ genannt, muss in den ersten 60-90 (Auer und Stick 2012; Huchzermeyer 2015), bzw. 20-40 (Ueltschi 1987) Sekunden nach Applikation des Radioisotopes aufgezeichnet werden. Es wird als Radionuklidangiogramm (RNA) bezeichnet (Ueltschi 1987). Es dient zur Ermittlung der Perfusion, v.a. im Bereich der distalen Gliedmaßen des Pferdes.

2.) Weichteil-Phase:

Die Weichteil-Phase beginnt in den ersten 5 - 20 Minuten post injectionem (p.i.) (Whitelock 1997). In diesem Zeitraum ist die radioaktive Substanz in den extrazellulären Raum diffundiert. Eine Diffusion bis in das Knochengewebe hat zu diesem Zeitpunkt noch nicht nennenswert stattgefunden. In der Humanmedizin wird die Weichteilphase üblicherweise 3 bis 5 Minuten p.i. aufgenommen.

3.) Knochen-Phase:

Die Knochenphase beginnt unmittelbar und ist 2 Stunden (Auer und Stick 2012) bzw. 3-4 Stunden p.i. (Ueltschi 1987) grafisch am besten auswertbar. Die Knochenenden (Epiphysen, Metaphysen) sind immer besser belegt als die Diaphysen.

Vor der Bildakquisition wird das Pferd sediert und die angebrachten Abdeckungen an Beinen werden abgenommen. Bei Aufnahme der Bilder sollte auf eine seitengleiche Positionierung der gewünschten Körperareale geachtet werden, um eine möglichst korrekte Vergleichbarkeit zwischen beiden Seiten zu schaffen. Da die Kollimator-Septen nur Gammastrahlung zum Detektor durchdringen lassen, welche sich parallel zu den Septen bewegen, sollte eine möglichst orthograde Positionierung vor der Kamerafläche gewählt werden, um ein ideales Bildergebnis zu erzielen. Der Abstand zum Detektor (Gammakamera) sollte so gering wie möglich gehalten werden, um die Abbildungsqualität zu optimieren. Die wichtigsten Faktoren für eine gute Bildqualität sind eine gut eingestellte Kamera, ein sehr ruhig stehender Patient und ein möglichst

geringer Objektabstand zwischen Patient und Kollimator (Dyson 2003). Zur Aufnahme der Hüftknochen sollte die Blase mittels Diuretikum entleert werden, um Überstrahlungseffekte gering zu halten. Bei einer gefüllten und mit Tc angereicherten Harnblase ist es unmöglich eine Interpretation der angrenzenden Strukturen vorzunehmen (Dyson 2014).

2.5 Dosimetrie

2.5.1 Rechtliche Grundlagen für beruflich strahlenexponierte Personen

Als beruflich strahlenexponiert gelten Personen, die durch ihre berufliche Tätigkeit mit radioaktiven Stoffen eine (zusätzliche) effektive Dosis von > 1 mSv pro Jahr erreichen. Der Gesetzgeber verlangt, dass beruflich strahlenexponiertes Personal überwacht wird. „An Personen, die sich im Kontrollbereich aufhalten, ist die Körperdosis zu ermitteln“ (§ 40 StrlSchV, 2012). Die Dosimetrie dient dem Nachweis ionisierender Strahlung und beschreibt die Messung der in Materie absorbierten Energie ionisierender Strahlung mithilfe von Dosimetern. Die Dosimeter müssen dabei laut § 41 StrlSchV an einer repräsentativen Stelle der Körperoberfläche, in der Regel am Rumpf, angebracht werden. Bei Verwendung einer Bleischürze wird das Dosimeter unterhalb der Bleischürze angebracht. Bei hohen Strahlenexpositionen kann zusätzlich das Tragen eines sekundären Dosimeters über der Bleischürze angeordnet werden, um Dosisaufzeichnungen der von der Bleischürze nicht abgedeckten Körperteile zu bekommen.

In StrlSchV § 54 und RöV § 31a werden Angaben über Dosisbegrenzungen bei der Berufsausübung gemacht. Unterschieden werden Kategorie (Kat.) A und B, welche sich auf die jährliche effektive Dosis und die jeweiligen Organdosen beziehen. In Kat. A werden beruflich strahlenexponierte Personen eingeteilt, welche im Kalenderjahr einer effektiven Dosis von > 6 mSv oder einer Organdosis von > 45 mSv für die Augenlinse oder > 150 mSv für Haut, Hände, Unterarme, Füße oder Knöcheln ausgesetzt sind. In Kat. B werden alle Personen eingeteilt, welche im Kalenderjahr einer höheren effektiven Dosis als 1 mSv oder einer höheren Dosis als 15 mSv für die Augenlinse oder einer höheren Organdosis als 50 mSv für die Haut, Hände, Unterarme, Füße oder Knöchel ausgesetzt sind, ohne in die Kat. A zu fallen. Ein Grenzwert für beruflich strahlenexponiertes Personal wird in § 55 StrlSchV mit 20 mSv pro Kalenderjahr angegeben. In Einzelfällen kann eine effektive Dosis von 50 mSv zugelassen werden, solange für fünf aufeinanderfolgende Jahre eine Gesamtdosis von 100 mSv nicht überschritten wird. Grenzwerte der Organdosen betragen für die Augenlinse 150 mSv, für Haut, Hände, Unterarme, Füße und Knöchel jeweils 500 mSv, für Keimdrüsen, Gebärmutter und Knochenmark jeweils 50 mSv, für Schilddrüse und Knochenoberfläche jeweils 300 mSv und für Dickdarm, Lunge, Magen, Blase, Brust,

Leber, Speiseröhre und diverse andere Gewebe jeweils 150 mSv pro Kalenderjahr. Die Berufslebensdosis ist auf maximal 400 mSv festgesetzt. Für Frauen im gebärfähigen Alter gilt zudem eine maximale monatliche Organdosis der Gebärmutter von 2 mSv. Die Organdosis der Gebärmutter darf während der gesamten Schwangerschaft 1 mSv nicht überschreiten. Eine Frau muss unverzüglich nach Bekanntwerden ihrer Schwangerschaft dem Strahlenschutzbeauftragten davon Mitteilung machen. Für Personen im Alter von 16-18 Jahren ist eine maximale effektive Dosis von 5 mSv pro Jahr festgesetzt. Die Personendosimeter sind der Messstelle nach Ablauf eines Monats unverzüglich einzureichen. Es ist anzumerken, dass bei allen angegebenen Dosen die natürlichen und eigenen medizinischen Strahlenexpositionen nicht mitberücksichtigt werden (Strahlenschutzverordnung 2012).

Die Richtlinie Strahlenschutz in der Tierheilkunde 2005, beruhend auf Grundlagen aus der StrlSchV und RöV, führt die Sachkunde im Strahlenschutz, den Schutz beruflich strahlenexponierter Personen und spezielle Regelungen für die Anwendungen nach Röntgen- und Strahlenschutzverordnung näher auf. Tierärzte, die Röntgenaufnahmen anfertigen wollen, müssen alle 5 Jahre einen Kurs mit anschließender Prüfung ablegen, indem sie ihre Fachkunde auffrischen und überprüfen lassen. Zudem muss gemäß § 31 Abs. 2 StrlSchV min. ein Strahlenschutzbeauftragter für Strahlenschutzangelegenheiten, welche den Vorschriften der StrlSchV unterliegen, beauftragt werden. Dieser ist gegenüber Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der Klinik/ des Institutes weisungsbefugt. Vor Beginn einer Tätigkeit mit ionisierenden Strahlen müssen alle Mitarbeiter einer Strahlenschutzbelehrung durch den zuständigen Strahlenschutzbeauftragten unterzogen werden. Diese muss im Abstand von 12 Monaten mündlich oder schriftlich wiederholt werden.

Der Begriff der Tier-Betreuungsperson wird in Kapitel 4 genauer definiert. Es handelt sich um Personen, die außerhalb ihrer beruflichen Tätigkeit freiwillig oder mit Einwilligung ihres gesetzlichen Vertreters Tiere betreuen, an denen in Ausübung der Tierheilkunde radioaktive Stoffe oder ionisierende Strahlung angewendet werden. Ihre Anwesenheit kann dann erforderlich sein, wenn sie auf das Tier einen beruhigenden Einfluss ausüben und es festhalten. Sie müssen vor Anwendung auf Gefahren beim Umgang mit radioaktiven Stoffen und ionisierender Strahlung hingewiesen werden und ihre Belehrung muss schriftlich dokumentiert werden. Ihre Körperdosis ist zu ermitteln und die Aufzeichnungen nach Anlage 11 aufzubewahren (Richtlinie Strahlenschutz in

der Tierheilkunde 2005). Die Strahlenexposition darf den Grenzwert für Einzelpersonen der Bevölkerung nicht überschreiten. Laut § 32 RöV und §46 StrlSchV beträgt der Grenzwert für Einzelpersonen der Bevölkerung 1 mSv pro Kalenderjahr. Des Weiteren sind in Anlage 1 bis 3 in der Richtlinie für Strahlenschutz 2005 Bestimmungen für den Erwerb der Fachkunde im Strahlenschutz von Grundkurs bis Aktualisierungskurs angefügt. Der Erwerb der Fachkunde beinhaltet min. 24 Unterrichtseinheiten á 45 Minuten. Nach erfolgreicher abgelegter schriftlicher Prüfung wird ein Zertifikat nach Anlage 4 - 6 ausgestellt.

Dosisgrenzwerte für beruflich strahlenexponiertes Personal der Kat. A und B nach § 54 Strahlenschutzverordnung und § 31 RöV sind in Tab. 1 aufgeführt. Die Dosisgrenzwerte für die Bevölkerung liegen bei 1 mSv pro Jahr, Jahresgrenzwerte für die Augenlinsen bei 15 mSv, für Haut, Hände und Füße bei 50 mSv.

	Kat. A	Kat. B
effektive Dosis	< 20 mSv	< 6 mSv
Augenlinse	< 45 mSV	< 15 mSv
Haut,Hände, Unterarme, Füße, Knöchel	< 150 mSv	< 50 mSv
Berufslebensdosis	400 mSv	

Tab.1: Dosisgrenzwerte für beruflich strahlenexponiertes Personal der Kat. A und Kat. B

2.5.2 Dosismessgrößen

Der Begriff Dosis bezieht sich im Strahlenschutz auf die biologisch bewertete Energiedosis im Gewebe. Sie ist demnach ein Maß für die biologische Wirksamkeit und somit für das Risiko ionisierender Strahlen. Die Ermittlung der monatlichen Personendosis für beruflich exponiertes Personal ist gesetzlich vorgeschrieben (siehe 2.5.1 Rechtliche Grundlagen).

2.5.2.2 Energiedosis D

Die Energiedosis D gibt die Energie an, die pro Masse bestrahlten Gewebes absorbiert wird. Sie wird in Gray (Gy) gemessen. 1 Gy entspricht somit 1 Joule / kg (Gewebe).

2.5.2.3 Äquivalentdosis H

H steht für englisch: „hazard“ und bedeutet so viel wie Gefahr. Die Äquivalentdosis H ist das Produkt aus der Energiedosis D und dem Qualitätsfaktor W_R , der die biologische Wirkung unterschiedlicher Strahlungsarten in organischem Gewebe berücksichtigt, und wird in Sievert (Sv) angegeben.

$$H = W_R * D$$

Formel 1: Berechnung der Äquivalentdosis

Unterschiedliche Strahlenarten können bei gleicher Energiedosis D verschiedene biologische Wirkungen haben. Die in Tab. 2 aufgeführten Strahlungswichtungsfaktoren w_R zur Berechnung der Äquivalentdosis H wurden von der ICRU (International Commission on Radiation Units & Measurements) festgelegt und sollen die relative biologische Wirksamkeit widerspiegeln (Schicha et al. 2007).

Strahlenart	Energiebereich	Strahlungswichtungsfaktor w_R
Photonen		1
Elektronen		1
Neutronen	< 10keV	5
	10 keV bis 100 keV	10
	>100 keV bis 2 MeV	20
	>2 MeV bis 20 MeV	10
	>20 MeV	5
Alphateilchen		20

Tab. 2: Strahlungswichtungsfaktoren w_R

3.3.2.3 Effektive Dosis H_{eff}

Die Verteilung eines Radionuklids im Körper findet in verschiedenen Organen spezifisch statt. Zur Abschätzung des Strahlenrisikos kann die effektive Dosis herangezogen werden.

Die effektive Dosis bezieht sich auf die Äquivalentdosis und berücksichtigt zudem die Strahlenempfindlichkeit beteiligter Organe oder Gewebe mit der in Anlage 3 der RöV angegebenen Gewebewichtungsfaktoren w_T . Sie wird in der Einheit Sv angegeben. Es werden die Organdosen H_T der einzelnen Organe bestimmt und mit den organspezifischen Gewebewichtungsfaktoren w_T multipliziert. Die Ergebnisse werden summiert, somit ergibt sich die effektive Dosis H_{eff} als

$$H_{eff} = \sum (w_T * H_T)$$

Formel 2: Berechnung effektive Dosis H_{eff}

Bei dem Gewebewichtungsfaktor w_T handelt es sich um einen Faktor, mit dem die Organdosis in einem Gewebe oder Organ T gewichtet wird, um den relativen Beitrag dieses Gewebes oder Organs zum gesamten, bei homogener Bestrahlung des Körpers hervorgerufenen Schadensmaß (Detriment) wiederzugeben (ICRP Veröffentlichung 103). Mit Hilfe der Gewebewichtungsfaktoren wird aus der Energiedosis für einzelne Organe in der Summe die effektive Dosis als eine Ganzkörperdosis berechnet, wenn verschiedene Gewebe oder Organe insbesondere bei Teilkörperexpositionen und bei der Inkorporation von Radionukliden unterschiedlich hoch strahlenexponiert sind. In der ICRP-Empfehlung Nr. 103 werden die Gewebe-Wichtungsfaktoren der ICRP-Empfehlung Nr. 60 aktualisiert (Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)).

Gewebe und Organe	Gewebewichtungsfaktoren		
Aktualisiert	1977	1990	2007
Keimdrüsen	0,25	0,20	0,08
Knochenmark	0,12	0,12	0,12
Dickdarm		0,12	0,12
Lunge	0,12	0,12	0,12
Magen		0,12	0,12
Blase		0,05	0,04
Brust	0,15	0,05	0,12
Leber		0,05	0,04
Speiseröhre		0,05	0,04
Schilddrüse	0,03	0,05	0,04
Haut		0,01	0,01
Knochenoberfläche	0,03	0,01	0,01
Andere Organe und Gewebe	0,06	0,05	0,12

Tab. 3: Gewebewichtungsfaktoren im Laufe der Zeit

Die Gewebewichtungsfaktoren wurden erstmals 1977 vom ICRP publiziert (ICRP Publication 60). Diese Faktoren können nicht errechnet werden, sondern werden aus umfangreichen statistischen Abschätzungen abgeleitet. Daraus ergibt sich auch die oben dargestellte Änderung dieser Faktoren.

2.5.2.4 Körperdosis

Nach den oben genannten Ausführungen über die effektive Dosis, denen überwachte Personen ausgesetzt sind, müssten prinzipiell die Organdosen aller relevanten strahlenexponierten Organe einzeln ermittelt werden. Dieser Aufwand ist im beruflichen Strahlenschutz fast nie relevant und wäre extrem impraktikabel. Stattdessen wird im Strahlenschutz die Personendosis beruflich strahlenexponierter Personen anhand eines tragbaren Filmdosimeters ermittelt, welches einmal pro Monat zur Auswertung an eine amtliche Messstelle geschickt wird. Diese Dosis wird als effektive Dosis gewertet. Die Dosis für einzelne Körperteile, Organe und Gewebe wird dabei nicht ermittelt.

2.5.3 Personendosimetrie

Es existieren verschiedene dosimetrische Messsysteme. Für Röntgen- und γ -Strahlung werden am häufigsten Ionisationskammer-Dosimeter, Thermolumineszenz-Dosimeter und Filmdosimeter verwendet, welche für die Personen-Dosimetrie im Klinikalltag die größte Bedeutung haben.

2.5.3.1 Ionisationskammerdosimeter

Diese Detektoren werden v.a. in der Personendosimetrie bei Röntgen- und γ -Strahlung benutzt und zeichnen sich durch eine hohe Sensitivität aus. Der Dosismessbereich liegt zwischen 0,1 $\mu\text{Gy/h}$ und 10 Gy/min (Krieger 2013).

Aufgrund Ihrer einfachen Bauweise, der vielfachen Einsetzbarkeit und Robustheit wird im klinischen Alltag vorwiegend der Gasionen-Detektor eingesetzt.

In einer mit Gas gefüllten Kammer befinden sich zwei Elektroden mit gegensätzlicher Polarität. Zwischen den Elektroden ist eine Gleichspannung angelegt. Dadurch werden Ionen, die durch ionisierende Strahlung entstehen, getrennt. Die entstandenen Ladungsträger werden jeweils von den entgegengesetzten geladenen Elektroden angezogen, wodurch ein Strom als elektrisches Signal gemessen werden kann. Je größer die Kammer, desto empfindlicher das Messsystem, da mehr Wechselwirkungen entstehen können (Roth 2008). Die Stromstärke spiegelt die Intensität der einfallenden ionisierenden Strahlung wider. Mithilfe von Kalibrier- und Korrekturfaktoren wird daraus der Dosiswert berechnet und angezeigt (Kiefer und Kiefer 2003).

2.5.3.2 Filmdosimeter

Das in der Personendosimetrie am häufigsten verwendete Dosimeter ist das Filmdosimeter. Es handelt sich um ein nach § 35 der RÖV amtliches Festkörperdosimeter und ist geeignet für Photonen- und Betastrahlen zwischen 20 keV und 3 MeV. Ein Dosisbereich von 0,1 mSv bis 1 Sv kann erfasst werden (Krieger 2013). Es wird zur Überwachung von beruflich strahlenexponierten Personal in Kontrollbereichen eingesetzt. Es besteht aus einer Kunststoffkassette, in der sich zwei Filme, verschiedene Metallfilter und eine strahlungsempfindliche Emulsionsschicht mit Silberbromidkristallen befinden. Bei Eintritt von ionisierender Strahlung werden Silberatome ionisiert, der Film wird geschwärzt. Um die Energie der einfallenden

Strahlen bestimmen zu können, ist der Film zum Teil mit Metallfiltern abgedeckt. Je größer die einfallende Energie, umso mehr Felder werden durch Ionisation getrübt. Der Grad der Schwärzung ist ein Maß für die Strahlendosis und wird anhand eines Densitometers errechnet.

2.5.3.3 Thermolumineszenz- Dosimeter

Durch ionisierende Strahlung entstehen in geeigneten Kristallen metastabile Energieniveaus. Zum Auslesen dieser Dosimeter werden die Kristalle auf 200 bis 400 °C erhitzt, wodurch die gespeicherte Energie in Form von Lichtblitzen emittiert wird, die mit einem PMT gemessen werden können. Die emittierte Lichtmenge ist ein Maß für die im Kristall gespeicherte Dosis (Krieger 2013). In der klinischen Dosimetrie findet oft Lithiumfluorid als Thermolumineszenz-Material Verwendung, da es den dosimetrischen Eigenschaften des menschlichen Gewebes entspricht (Krieger 2013).

2.6 Strahlenschutz

Beim Strahlenschutz müssen zwei unterschiedliche Aspekte beachtet werden. Zum einen der gesetzliche Strahlenschutz und zum anderen klinisch praktikable Strahlenschutzmaßnahmen. Der Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen im Bereich der Nuklearmedizin ist durch die StrlSchV geregelt. Anders als beim Röntgen wird das Tragen einer Röntgenschürze während einer Szintigrafie sowohl im human- als auch im veterinärmedizinischen Bereich gesetzlich nicht vorgeschrieben. Viele Autoren befassten sich mit dem Thema der beruflich bedingten Strahlungsexposition in der Nuklearmedizin und mit Lösungsansätzen zur Reduktion der effektiven Dosis.

Eine Bleischürze kann Gammastrahlung reduzieren (Busse et al. 2008; Dyson 2003; Warren-Forward et al. 2007; Gatherer et al. 2007; Steyn und Uhrig 2005; Auer und Stick 2012; Neuwirth und Romine 2000). Smart spricht bei einer Bleidicke von 0,5 mm von einer Reduktion um den Faktor 2, Nelson und Ballegeer in Auer und Stick 2012 beschreiben einen Dosis-Reduktionsfaktor um 4-6 pro 0,5 mm Blei. Pilsworth und Goldstone beschreiben in Dyson 2003 eine Reduktion um einen Faktor 10 bei einer Bleidicke von 1 mm. Zudem empfehlen sie, den Pferden zur Szintigrafie eine Bleidecke aufzuziehen. Je nach aktuell szintigrafierten Bereich können Teile mit der Decke

auf- und wieder abgedeckt werden. Die Strahlenexposition des Personals könnte durch das Anlegen einer 0,5mm Bleidecke um 60-70% eingespart werden (Dyson 2003).

Die Meinungen zum Nutzen einer Bleischürze bei der Skelettszintigrafie gehen dennoch stark auseinander. Raten diverse Autoren ganz klar zum Tragen einer Schürze (Baixeras et al. 2004; Neuwirth und Romine 2000; Warren-Forward et al. 2007; Bayram et al. 2011; Steyn und Uhrig 2005; Smart 2004), bezweifeln andere Autoren deren Wirksamkeit und äußern Bedenken bezüglich einer gesteigerten Strahlungswirkung durch den sog. „strahlenhärtenden Effekt“ und der auftretenden Bremsstrahlung (Röntgenstrahlung) unter der Schürze. Sie begründen Ihre Zweifel durch die Aussage, dass 140 KeV Gammaenergie zu hoch seien, um durch eine 0,5 mm Bleischicht gestoppt zu werden (Fahey et al. 2016). Aktuelle Studien befassten sich zudem näher mit der Frage, ob eine Leichtgewicht-Weste aus einer Materialmischung (Blei, Wolfram und Barium) für den Einsatz empfehlenswert ist, oder nicht (Warren-Forward et al. 2007; Muir et al. 2005). Warren-Forward et al. beschreiben die Vorteile einer Leichtgewicht-Bleischürze mit reduzierter Gewichtskomponente um ca. 40% und somit verringerter Rückenprobleme der Träger. Eine handelsübliche Bleiweste kann bei längerem Tragen unangenehmen Druck im Bereich der Schultern ausüben und durch das Gewicht langfristig Rückenprobleme verursachen. Die Autorin beschreibt es als „Irrglauben“ eine Schürze erhöhe durch niedrig energetische Photonen unterhalb der Schürze das Strahlungsrisiko. Trotz mangelnder Untersuchungen bezüglich des Zwecks und der Effektivität von Bleischürzen sprechen sie eine eindeutige Empfehlung für das Tragen einer Bleischürze bzw. auch einer Leichtgewicht-Bleischürze aus. Durch die Mischung verschiedener Materialien kann die Wahrscheinlichkeit der photoelektrischen Absorption in der Schürze gesteigert werden (Warren-Forward et al. 2007). In einer Studie konnte gezeigt werden, dass die meisten Leichtgewicht-Schürzen dieselbe Reduktion der Strahlungsenergie leisten, wie Standard 0,5 mm Bleischürzen (Muir et al. 2005). In Standard-Werken der Veterinärmedizin (Dyson 2003; Auer und Stick 2012) wird ebenfalls das Anlegen einer Bleischürze empfohlen.

Je nach Höhe der Exposition wird zwischen Überwachungsbereichen, Kontrollbereichen und Sperrbereichen unterschieden. Sperrbereiche sind ein Teil des Kontrollbereiches. Überwachungsbereiche sind nicht zum Kontrollbereich gehörende Bereiche, in denen Personen im Kalenderjahr eine effektive Dosis von $> 1 \text{ mSv/a}$ und

höhere Organdosen als 15 mSv für die Augenlinse, 50 mSv für Haut, Hände, Unterarme, Füße oder Knöchel erreichen können.

Kontrollbereiche sind Bereiche, in denen Personen im Kalenderjahr eine effektive Dosis von > 6 mSv oder höhere Organdosen als 45 mSv für die Augenlinse oder 150 mSv für die Haut, Hände, Unterarme, Füße oder Knöchel erreichen können.

Sperrbereiche sind Bereiche, in denen eine Ortsdosisleistung von >3 mSv/h erreicht wird (Strahlenschutzverordnung 2012, S. 33–34).

2.7 Strahlenexposition

2.7.1 Natürliche Strahlenexposition

Der Hauptteil der Strahlungsexposition des Menschen geht aus natürlichen Quellen hervor. Jeder Organismus kommt täglich mit ionisierender Strahlung in Berührung. Eine in Deutschland lebende Person kommt jährlich auf eine natürliche Dosis von ca. 2,1-2,4 mSv (National Research Council Committee's Report). Diese Werte sind abhängig von vielen Faktoren wie dem Wohnort und den Lebensgewohnheiten. Externe Exposition durch kosmische Strahlung (Zunahme in Höhenlagen) und terrestrische Strahlung (Erd- und Gesteinsschichten), sowie interne Exposition durch Inhalation von Radon-222, Ingestion von Kalium-40 (K-40) und Kohlenstoff (C-14) bestimmen die Höhe der Strahlungsdosis. Ca. 30 % der jährlichen Dosis gehen auf die Inhalation von Radon zurück, 7 % auf die Inkorporation durch Nahrung (v.a. K-40 und C-14), 12 % durch terrestrische Strahlung, knapp 7 % durch kosmische Strahlung. Die Strahlenexposition durch medizinische Diagnostik wird mit 43 % angegeben und ist mit im Mittel 2 mSv/Jahr ähnlich hoch wie die natürliche Exposition. Daran ist die Röntgendiagnostik mit 1,8 mSv, die Nuklearmedizin mit 0,1 bis 0,2 mSv/Jahr beteiligt (Bundesamt für Strahlenschutz - BfS). Die daraus resultierende effektive jährliche Strahlenexposition wird mit ca. 4,3 mSv angegeben.

Radon stellt die Hauptquelle der internen Strahlungsexposition dar. Vor allem Innenraum-Expositionen und Zerfallsprodukte können Lungenkarzinome auslösen. Einer von 10 Erkrankten könnte auf die schädliche Wirkung von Radon zurückzuführen sein (McColl et al. 2015b). Das Vorkommen von Radon in der Luft ist gebietsabhängig

unterschiedlich. Das Bundesamt für Strahlenschutz veröffentlicht regelmäßig aktuelle Karten über die Radonkonzentration der Bodenluft in kBq/ m³. Die Karte ist ein Maß dafür, wieviel Radon im Untergrund vorhanden ist und somit zum Eintritt in Gebäude bereitsteht. Die Aktivitätskonzentrationen im Boden schwanken regionsabhängig von < 20 kBq/ m³ bis zu > 100 kBq/ m³. Die Radonkonzentration in der Innenraum-Luft wird maßgeblich durch das Baualter und den Zustand der Gebäude beeinflusst. Die Strahlenschutzkommission hat anhand von Studien eine statistische Signifikanz für Lungenkrebsrisiken ab einer Radonkonzentration von > 150 Bq/m³ festgestellt. Die offizielle Empfehlung lautet daher die Radonkonzentration in Innenräumen auf < 100 Bq/m³ zu senken. Als Sofort-Maßnahmen sollte man die mechanische Querlüftung des Kellers anstreben (durch Ventilatoren leichten Überdruck im Keller erzeugen) und Unterdruck im Wohnraum durch richtiges Lüftungsmanagement vermeiden. Instandsetzungsmaßnahmen inkludieren das Beseitigen von Fugen der Rissen in Boden und Wänden, den Einbau von Ventilationssystemen, Luft-Luft-Wärme Pumpen oder Wärmetauschern (Bundesumweltministerium 2004). Trotz Umbaumaßnahmen bleiben Umwelteinflüsse bestehen. Natürliche Strahlungsexposition lässt sich nicht vermeiden. Somit ist ein Schutz vor Strahlung in Gänze nicht möglich (Mehlhorn 1964). Durch Ingestion werden C-14 und K-40 aufgenommen. Kalium und Kohlenstoff sind in organischem Gewebe permanent enthalten, die Aktivität an radioaktivem C-14 beträgt etwa 60 Bq/kg, die an K-40 ebenfalls ca. 60 Bq/kg. Diese Konzentrationen sind weitgehend konstant und unabhängig von diätetischen Maßnahmen. In Trinkwasser können weitere natürliche Radionuklide vorkommen, z.B. Uran-238, Radium-226 und 228, Blei-210, Polonium-210 und Thorium-232. All diese Radioisotope sind aber für die Strahlenexposition von Menschen im Allgemeinen irrelevant. Kosmische Strahlung entsteht im Weltall und trifft nach Ihrem Durchgang durch die Atmosphäre auf der Erde auf. Sie wird dabei durch die Lufthüllen teilweise absorbiert. Damit entsteht eine Abhängigkeit der Dosisleistung von der Höhe über dem Meeresspiegel. Die Dosisleistung steigt mit Zunahme der Höhenlage an.

2.7.3 Berufliche Strahlenexposition des veterinärmedizinischen Personals

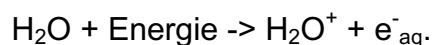
Die Skelettszintigrafie wurde ein wichtiger Baustein in der Diagnostik von Lahmheiten beim Pferd, doch sind wenige publizierte Arbeiten über das Strahlenrisiko für involvierte Personen vorhanden (Whitelock 1997; Voute et al. 1995; Weaver 1995; Gatherer et al. 2007).

Um beruflich strahlenexponiertes Personal zu schützen, wurden Regularien eingeführt, welche in der StrlSchV und RöV geregelt werden (siehe 2.5.1)

Veterinärmedizinisches Personal kommt vor allem durch Aufnahme von Röntgenbildern in Kontakt mit ionisierender Strahlung. Zusätzliche Expositionen treten beim CT und in der Skelettszintigrafie auf. Radiojodtherapien zur Behandlung der Hyperthyreose bei der Katze sind ebenfalls eine weitere potentielle Strahlenquelle für behandelnde Tierärzte und Tierpfleger.

2.7.4 Biologische Strahlenfolgen

Ionisierende Strahlung hemmt die Teilung und Proliferation von Zellen und kann zum Untergang von Zellen führen. Diese zellulären Vorgänge sind die schwerwiegendsten Folgen von Strahlung und werden bei der Behandlung von Tumoren genutzt. Die Strahlenempfindlichkeit ist in der Mitosephase, in welcher die Zellteilung stattfindet, am höchsten. Schaden an Zellbestandteilen wie der Nukleinsäure, Proteinen und Zellorganellen sind von der Dosis der Strahlung abhängig. Schäden an der DNS (Einzelstrangbrüche, Doppelstrangbrüche, Mehrfachstrangbrüche, DNA-Vernetzung und Basenschäden) sowie Strukturveränderung von Proteinen und Zellorganellen können deletäre Auswirkungen auf den Organismus haben. Zellen bestehen zu 80 % aus Wasser, die restlichen 20 % bestehen aus organischem Material wie DNA, Membranen und Proteinen. Bei Eintreffen von Strahlung auf eine Zelle zerfällt das Wassermolekül in die Radikale H und OH. Bei Energien > 10 eV kommt es zur Ionisation des Wassers. Dabei wird ein Bindungselektron freigesetzt:



Die freien Radikale H und OH, sowie e^-_{aq} reagieren miteinander und mit Biomolekülen. Zusammen mit O_2 reagieren sie zu Peroxiden, welche gewebetoxisch sind und die

Strahlenwirkung bis um das Dreifache steigern können (Debus et al. 2011). Diese Radikale erzeugen an der DNA Radikalstellen und führen somit über eine indirekte Strahlenwirkung zu Schädigung der DNA. Beim Röntgen ist die Strahlenwirkung 2/3 indirekt und 1/3 direkt (Roth 2008). Die direkte Strahlenwirkung beschreibt den Einfall von Energie auf Atome und Moleküle und das Aufbrechen derer Bindungen und somit der Veränderung der chemischen Struktur in ein und demselben Biomolekül.

Strahlenfolgen werden unterschieden in deterministische und stochastische Strahlenschäden. Stochastisch bedeutet zufallsbedingt. Bei stochastischen Strahlenschäden hängt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von der Dosis ab. Die Schwere des stochastischen Strahlenschadens ist dagegen von der Dosis unabhängig. Eine stochastische Strahlenwirkung lässt sich vermuten in Dosisbereichen oberhalb von 100 mSv. Bei niedrigeren Dosen konnte bislang kein statistisch signifikanter Nachweis für die gesundheitsschädigende Wirkung von Strahlung aufgrund der großen natürlichen Schwankung erbracht werden. Weitere Forschungsprogramme für eine sichere Beurteilung stehen noch aus (Feinendegen 2016; National Research Council Committee's Report; Laurier et al. 2012). Bei deterministischen Strahlenschäden nimmt die Schwere des Schadens mit der Dosis zu. Es existiert eine Schwellendosis, welche minimalen, individuellen Schwankungen unterliegt. Demnach sind Ihre Folgen als deterministisch (vorhersagbar) einzustufen.

Akute Effekte einer Strahlendosis zeigen in der Regel ein dosisabhängiges Ausmaß, d.h. sie lassen sich in einer Dosiseffektkurve darstellen. Dennoch reagieren unterschiedliche Gewebe verschieden auf Strahlenwirkung, daher muss beachtet werden, dass eine individuelle Variationsbreite zu berücksichtigen ist. Akute Wirkungen sind i.d.R. reversibel, dennoch können Restschäden wie Gewebsveränderungen, „Strahlennarben“ genannt, zurückbleiben (Kiefer und Kiefer 2003). Das Ausmaß des akuten Strahlenschadens hängt von der Expositionsdauer ab (Debus et al. 2011). Akute Wirkungen äußern sich in Form von Funktionsstörungen von Organen, insbesondere im blutbildenden System, dem Magen-Darm-Trakt und der Augen (Katarakt-Bildung). Zudem kann bei sehr hohen Dosen das akute Strahlensyndrom auftreten, welches sich in drei Phasen untergliedern lässt. Unspezifische Symptome wie Kopfschmerzen, Übelkeit und Erbrechen, zeichnen die Prodromalphase, gefolgt von einer asymptomatischen Latenzphase. In der Hauptphase manifestieren sich

Strahlenschäden der betroffenen Organsysteme klinisch. Eine Dosis von > 7 Gy führt bei fast allen Menschen zum Tode innerhalb einiger Tage. Eine Dosis von > 100 Gy führt während oder unmittelbar nach Strahlungsexposition zum Tode (Debus et al. 2011). Zu Spätwirkungen zählen Tumorinduktion und genetische Folgeschäden (Mutationen). Im Vergleich zu deterministischen Strahlenschäden ist nicht die Dosis für die Entstehung entscheidend, sondern die Wahrscheinlichkeit des Auftretens. Die Effekte sind demnach stochastisch (zufällig).

Strahlenschutz in der Medizin (und Veterinärmedizin) und allgemein beim Arbeiten in kerntechnischen Anlagen hat zum Ziel, das Risiko stochastischer Schäden so gering wie möglich zu halten. Die immer wieder propagierte ALARA Leitlinie (As Low As Reasonably Achievable) fordert beim Umgang mit ionisierenden Strahlen durch das sogenannte Optimierungsgebot die Strahlenbelastung auch bei Strahlenexpositionen unterhalb der gesetzlich vorgegebenen Werte so gering wie irgendwie möglich zu halten. Das gegenwärtige Konzept des Strahlenschutzes geht davon aus, dass es für stochastische Strahlenschäden keine Schwellendosis gibt, dass also prinzipiell auch kleine Strahlungsdosen Spätschäden wie eine Tumorinduktion bewirken können. Nach dem „Linear-No-Threshold Model“ ist die Wahrscheinlichkeit für Strahlenschäden proportional zur empfangenen Dosis. Der Grundsatz dieses Modells ist die Annahme, dass Strahlungen auch in niedrigen Dosen als potentiell gefährlich einzustufen sind. Man geht hier davon aus, dass viele kleine Dosen in ihrer Summe einer großen Dosis gleichzusetzen sind und somit die gleichen Effekte auslösen.

Der Begriff „niedrige Dosis“ ist nicht klar definiert. Es existieren unterschiedliche Interpretationen von „low-dose“ bzw. niedriger Dosis. In der Literatur fanden sich Angaben von 0-100 mSv (National Research Council Committee's Report 2004), 2 mSv- 8000 mSv (Luckey 2008) und $< 0,5$ Gy (Kreuzer et al. 2015). Wissenschaftliche Belege über die Schädlichkeit von Strahlungen gibt es für den low-dose Bereich noch nicht (Kiefer und Kiefer 2003). Viele Autoren befassten sich in jüngster Vergangenheit mit der Thematik, jedoch konnte in keiner Studie eindeutige Zahlen hervorgebracht werden (Kreuzer et al. 2015; McColl et al. 2015a; Cardis et al. 2005; Mothersill und Seymour 2014). Gatherer et al. berichten in Ihrer Studie aus dem Jahre 2007 über die fehlende Kenntnis der Auswirkung von Strahlung in niedriger Dosis und der damit verbundenen Risiken an Krebs zu erkranken (Gatherer et al. 2007). Cardis et al.

berichten in Ihrer retrospektiven 15-Länder Studie, dass über 1 - 2% der Todesfälle von Nukleararbeitern auf die berufliche Strahlenbelastung zurückzuführen sein könnten. Dennoch kamen die Autoren zu dem Schluss, dass das Risiko für Arbeiter, in diesen Anlagen an Krebs zu erkranken, sehr gering sei. Genaue Zahlen für die Korrelation einer Krebserkrankung und der ausgesetzten Strahlung wurden mit 0,97 pro Sv angegeben (Cardis et al. 2005).

Große Studien wurden über die Opfer der Atombombenangriffe im Jahre 1945 auf Hiroshima und Nagasaki erstellt. Die Radiation Effects Research Foundation konnte mit einer Langzeitstudie über 50 Jahren herausfinden, dass über 60% der Opfer mit Dosen unter 100 mSv exponiert wurden und das Auftreten von Krebserkrankungen mit steigender Dosis anstieg. In westlichen Ländern sterben 20 bis 25% der Menschen an einem Karzinom. 1% davon könnte strahleninduziert sein (National Research Council Committee's Report 2004). Damit kommen mehrere Autoren zu dem Schluss, dass von chron. Strahlung in niedriger Dosis ein geringes Risiko für eine Krebserkrankung ausgeht (National Research Council Committee's Report 2004; McColl et al. 2015; Cardis et al. 2005). Eine Verbindung zu kardiovaskulären Erkrankungen konnte nicht nachgewiesen werden (Kreuzer et al. 2015). Die Ergebnisse sind bislang nicht ausreichend und die biologischen Mechanismen noch zu unklar. Offizielle Gremien wie die International Committee for Radiation Protection (ICRP), die National Academy of Sciences Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR) und das United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) vertreten das LNT-Modell. Das Linear-No-Threshold-Modell sagt aus, dass jegliche Art von Strahlung einer linearen Dosis-Wirkungs-Kurve ohne Schwellenwert unterliegt und somit auch ein Schädigungspotential bei niedrigen Dosen vorhanden ist. Auch wenn offiziell Zweifel bestehen, inwiefern dieses Modell zur Dosisabschätzung und Risikoeinstufung geeignet ist, halten sie aus Strahlenschutzgründen am LNT-Modell fest. Durch dieses Modell erfolgt stets eine Überschätzung möglicher Strahlengefahren.

Trotz der breiten Meinung über eine potenzielle Gefahr der chronischen Aussetzung von niedrigen Dosen besteht auch eine kontroverse Meinung zu dieser Thematik. Im Gegensatz zum LNT-Modell steht die Hypothese der Hormesis. Hormesis beschreibt,

dass Strahlung in niederen Energien eine positive Wirkung auf den Organismus haben kann. Wie Paracelsus bereits schon im 16.Jahrhundert sagte:

„All Ding' sind Gift und nichts ohn' Gift; allein die Dosis macht, dass ein Ding kein Gift ist.“

- Paracelsus, 1493-1541 -

Die Grenze von Strahlung in niedriger Dosis ist nicht festgelegt, wird aber von vielen Autoren mit Dosen < 100 mSv definiert (Laurier et al. 2012; Kreuzer et al. 2015; National Research Council Committee's Report 2004; Feinendegen 2016; Wakeford und Tawn 2010; Brooks et al. 2016) bzw. angegeben ab einer Dosisleistung von $< 0,5$ mGy/h (Wakeford und Tawn 2010) oder < 1 mSv/Min. (Laurier et al. 2012). Offizielle Gremien bezeichnen die Hormesis als nicht hinreichend überzeugend. Die schädliche Wirkung von Strahlung in niedriger Dosis wird dennoch von vielen Autoren bestritten (Luckey T.D. 2008; Tubiana et al. 2009; Feinendegen et al. 2010). L. Feinendegen und andere Autoren beschäftigen sich seit mehreren Jahren mit der Hormesis und beschreiben in vielen ihrer Veröffentlichungen den Fortschritt ihrer Forschung (Feinendegen et al. 2010; Feinendegen 2016; Tubiana et al. 2009). Luckey beschreibt bei einer chronischen Exposition von $2 - 8$ mSv pro Jahr eine gesteigerte Immunkompetenz, schnellere Wundheilung, gesteigerte DNA- und Zellreparatursysteme, gesteigerte Reproduktionsfähigkeit, reduzierte Mortalität und Morbidität, eine gesteigerte Lebenserwartung und eine erniedrigte Krebs-Rate (Luckey, 2008).

3 Eigene Untersuchungen

3.1 Material

3.1.1 Dosimetrierte Personen

Bei den Personen handelte es sich um Mitarbeiter der Klinik für Pferde (Chirurgie) in Gießen, welche im Rahmen der Szintigrafie von Pferden über einen Zeitraum von 1,5 Jahren mit Dosimetern ausgestattet wurden. Alle Personen hatten Erfahrung mit der Durchführung einer Szintigrafie und gehörten zu einem festen „Szintigrafie-Team“. Bei 43 Szintigrafien konnte die Strahlenexposition des beteiligten Personals untersucht und bei der Auswertung 384 Dosiswerte berücksichtigt werden. Vier verschiedene Personen, die im Rahmen der Szintigrafie unterschiedlich hohen Strahlenexpositionen ausgesetzt waren, wurden überwacht. Zunächst die Person, die die Radioaktivität aufbereitete (P1), die zweite Person, die das Pferd am Kopf festhielt (P2), die dritte Person, die das Pferd positionierte und ggf. Gliedmaßen aufhob und abschirmte (P3) und den Tierarzt (P4), der die Aktivität injizierte und 2 h später die Szintigrafie überwachte.

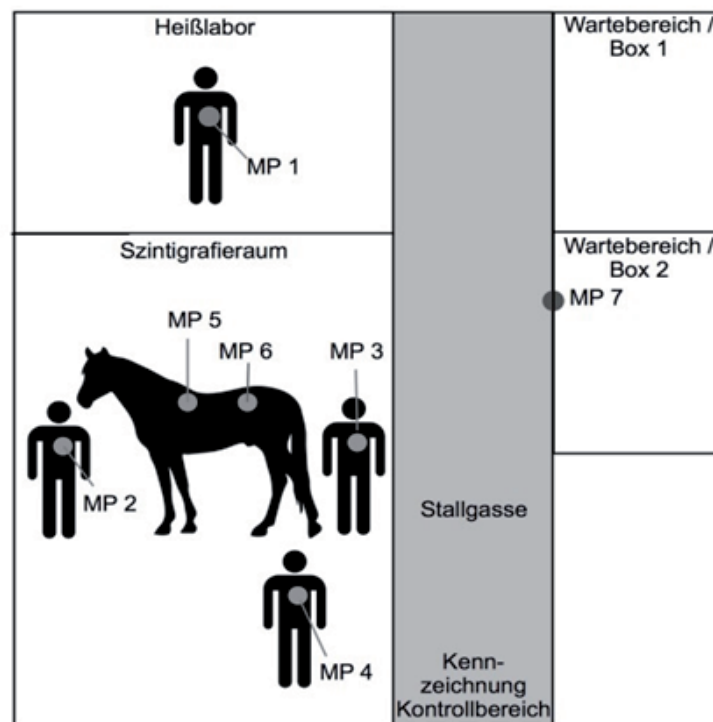


Abb. 3: Räumlichkeiten der Szintigrafie mit Beschreibung der Messpositionen

Die dosimetrische Überwachung erfolgte mit 4 unterschiedlichen Dosimetern, die entsprechend mit MP1, MP2, MP3 und MP4 bezeichnet werden. Tab. 4 beschreibt die Messposition am beteiligten Personal und am Pferd, sowie in der Stallgasse. In der Abb. 3 sind die Räumlichkeiten der Szintigrafie dargestellt. Personen 1-4 (P1-P4) werden an MP1-MP4 vermessen. MP5-6 betrifft die Messposition am Pferdekörper und MP7 die Messposition außerhalb der Pferdebox. Dabei wurden bei 33 Patienten Dosisaufzeichnungen für MP1-7 (s. Tab.4) und bei 10 Patienten Dosisaufzeichnungen ober-und unterhalb einer Bleischürze für MP1, MP2 und MP4 gemacht. Die Dosimeter wurden von allen Personen an der linken Brusttasche mit Hilfe eines Federclips befestigt. Keine der Personen trug eine Bleischürze. Die Bewegungsfreiheit wurde durch das Tragen der Dosimeter nicht beeinflusst. Es wurden feste Messpositionen vorgegeben, um die Daten miteinander vergleichen zu können.

3.1.2 Dosimetrierte Patienten

Das Patientengut stammte aus der Klinik für Pferde (Chirurgie) in Gießen. Einschlusskriterium stellte lediglich die Zeitdauer und die gewünschte Anzahl der aufgenommenen Szintigramme dar. Es wurden nur Pferde mit mindestens einem Scan des halben Körpers und mehr berücksichtigt. Die Pferde wurden vorstellig aufgrund eines unklaren Gangbildes bis hin zu gravierenden Lahmheiten. 24 der 43 Patienten waren Wallache, 19 der Patienten waren Stuten. Darunter befanden sich zwei Ponystuten, drei Islandpferde, die restlichen Pferde waren Großpferde im Alter zwischen 6 und 20 Jahren.



Abb. 4: Anbringung Dosimeter an MP5 u. MP6 mittels elastischer Binden

Die Pferde hatten ein Gewicht von 314 kg bis 720 kg. Der Vorstellungsgrund zur Szintigrafie variierte v.a. zwischen Lahmheiten von mehreren Gliedmaßen und Lahmheiten mit Verdacht auf Erkrankung im Bereich des Rückens oder der Hüfte. Die Patienten wurde an den MP5 und 6 gemessen. Die MP5 beschreibt die Dosis auf der Hautoberfläche an dem kaudalen Rand der proximalen Skapula, MP6 die Dosis auf der Hautoberfläche an dem kranialen Rand der Flanke (in der Nähe der Harnorgane).

An der Außenseite der Boxentüre wurde im Bereich ca. 1 Meter oberhalb des Bodens ein Dosimeter angebracht, welches als Messposition 7 gekennzeichnet wurde.



Abb. 5: Anbringung des Dosimeters (MP7) an der Pferdebox

Messposition	Anbringung	Beschreibung der Tätigkeit
MP1	linke Brusttasche	Aufbereitung Radioaktivität, Aufziehen, Anreichen, Kalibrieren der Kamera
MP2	linke Brusttasche	Halter am Kopf des Pferdes
MP3	linke Brusttasche	Hilfsperson zur Positionierung, Aufheben von GM, Abschirmen
MP4	linke Brusttasche	Injektion Radiopharmakon, Aufnahme Bilder
MP5	kaudaler Rand der proximalen Skapula	Auslesen der kumulierten Dosis am Pferd
MP6	kranialer Rand der Flanke	Auslesen der kumulierten Dosis am Pferd
MP7	Boxentüre	Auslesen der kumulierten Dosis an der Box

Tab. 4: Anbringung der Dosimeter und Beschreibung der Messpositionen

3.1.3 Dosimeter

In dieser Studie kamen Dosimeter der Mirion Technologies (RADOS) in Oy, Turku/Finnland zum Einsatz. Es handelte sich um das RAD-60 Dosimeter. Es ist ein digitales Taschendosimeter, das speziell für den Einsatz beruflich strahlenexponierter Personen entwickelt wurde. Der Messbereich wird angegeben mit einer Dosis von 1 μSv bis 9.99 Sv und einer Dosisleistung von 5 $\mu\text{Sv/h}$ – 3 Sv/h. Die Dosismessgröße ist

die Tiefen-Personendosis Hp(10) in μSv , mSv und Sv. Es weist Gamma-, Röntgen- und Photonenstrahlung nach und enthält Siliziumdioden. Die Vorzugsrichtung befindet sich senkrecht auf Seite des Dosimeters, auf der sich der Halteclip befindet. Durch seine Maße von 80 x 67 x 22 mm und einem Gewicht von 80 Gramm kann es problemlos an einer Brusttasche mit Hilfe des eingebauten Federclips befestigt werden. Das Gerät ist betriebsfähig bei einer Umgebungstemperatur von -20°C bis $+50^{\circ}\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte bis 90%. Durch das Hartplastik-Gehäuse ist es staubfest und spritzwassergeschützt. Die Geräte waren alle geeicht und somit für die Messungen betriebsbereit. Eine amtliche Eichung gilt nur für den am Dosimeter angezeigten Messwert.



Abb. 6: RAD-60SE Personen-Alarmdosimeter

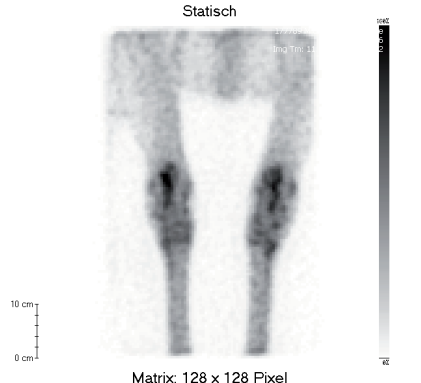
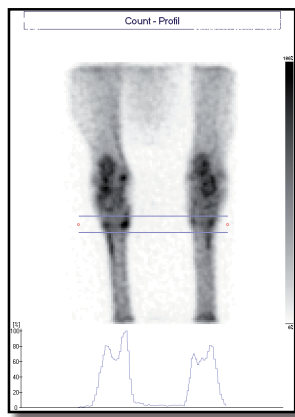
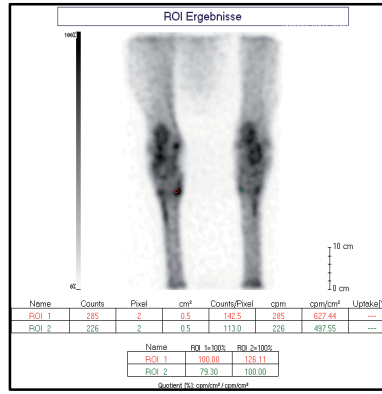
3.1.4 Gammakamera

In der Klinik für Pferde (Chirurgie) in Gießen befindet sich der „Equine Scanner H.R.[®]“, bestehend aus einer Szintillationskamera mit hochauflösendem Detektor, Scintron-Computer, Kollimator und Sicherheitstransformator der Firma MIE Medical Imaging Electronics in Seth, Deutschland. Die nach dem Anger-Prinzip aufgebaute Szintillationskamera kann von -15° bis 115° verstellt, und zusätzlich durch den Yoke von -45° bis 225° gedreht werden. Durch ein selbsttragendes Kranstativ kann die Szintigrafie am stehenden Patienten durchgeführt werden. Durch Gleitrollen kann die Kamera geräuscharm positioniert werden.

Die Szintillationskamera enthält im Messkopf einen NaJ-Kristall von 9,5 mm Dicke, der Gammastrahlung absorbiert und diese Energie in Form eines Lichtblitzes emittiert (= Szintillation). Im Inneren der Kamera befindet sich ein PMT-System bestehend aus 66 PMTs, die die Lichtblitze in Energie umwandeln und als Datensatz an den Computer weiterleiten, der daraus ein Bild berechnet. Der Kollimator ist mit Septen oder sog. Kollimatorlöchern ausgestattet. Durch die Septen werden die Gammaquanten absorbiert, die nicht senkrecht (oder nahezu senkrecht) auf den Kollimator einfallen (siehe Seite 7, Abb. 1).

Zur Bildauswertung wurde das Programm Scintron[®] der Firma MIE verwendet. Es beinhaltet neben einem Bewegungskorrekturprogramm (Paralyzer[®]) die Möglichkeit sogenannte ROI's (Region of Interest) zu erstellen und die Szintigramme in geeigneter Form zu bearbeiten. In Abb. 7, Abb. 8 und Abb. 9 sind die Bilder einer Tarsalgelenksaufnahme eines Pferdes dargestellt. Hier fand im Bereich der straffen Sprunggelenke eine Mehrbelegung statt, welche mithilfe der digitalen Bearbeitungsprogramme genauer interpretiert werden können.

Abb. 7 stellt ein Bild vor Bearbeitung dar, Abb. 8 ein Bild mit Bearbeitung im Count-Profil und Abb. 9 ein Bild mit Bearbeitung der ROIs.

<div><p>Statisch</p><p>Matrix: 128 x 128 Pixel</p></div>	<div><p>Count - Profil</p></div>	<div><p>ROI Ergebnisse</p><table><tr><th>Name</th><th>Counts</th><th>Pixel</th><th>cm²</th><th>Counts/Pixel</th><th>cpm</th><th>cpm/cm²</th><th>Update[%]</th></tr><tr><td>ROI 1</td><td>285</td><td>2</td><td>0.5</td><td>142.5</td><td>285</td><td>527.44</td><td>---</td></tr><tr><td>ROI 2</td><td>226</td><td>2</td><td>0.5</td><td>113.0</td><td>226</td><td>497.55</td><td>---</td></tr></table><table><tr><th>Name</th><th>ROI 1=100%</th><th>ROI 2=100%</th></tr><tr><td>ROI 1</td><td>100.00</td><td>126.11</td></tr><tr><td>ROI 2</td><td>79.30</td><td>100.00</td></tr></table><p>Standard ROI count/cm²/region/cm²</p></div>	Name	Counts	Pixel	cm²	Counts/Pixel	cpm	cpm/cm²	Update[%]	ROI 1	285	2	0.5	142.5	285	527.44	---	ROI 2	226	2	0.5	113.0	226	497.55	---	Name	ROI 1=100%	ROI 2=100%	ROI 1	100.00	126.11	ROI 2	79.30	100.00
Name	Counts	Pixel	cm²	Counts/Pixel	cpm	cpm/cm²	Update[%]																												
ROI 1	285	2	0.5	142.5	285	527.44	---																												
ROI 2	226	2	0.5	113.0	226	497.55	---																												
Name	ROI 1=100%	ROI 2=100%																																	
ROI 1	100.00	126.11																																	
ROI 2	79.30	100.00																																	
<p>Abb. 7: Bsp. Szintigramm Tarsus 180°</p>	<p>Abb. 8: Bsp. Szintigramm Bearbeitung Count-Profil</p>	<p>Abb. 9: Bsp. Szintigramm Ermittlung ROI</p>																																	

3.1.5 Radiopharmakon

Nach Gewinnung von Natriumpertechnetat-Lösung aus dem Mo99 / Tc99m – Generator wurde pro Szintigrafie unter aseptischen Bedingungen zu Natriumoxidronat in Pulverform (Technescan HDP® der Firma Mallinckrodt Medical B.V. in Petten) Tc99m-Pertechnetat-Lösung hinzugegeben. Nach einer kurzen Reaktionszeit (und Schütteln) war die Bindung von Natriumoxidronat und Natriumpertechnetat (Tc99m) vollständig und das Radiopharmazeutikum konnte verwendet werden. Das so enthaltene Radiopharmakon (Tc99m- Oxidronat) ist für intravenöse Injektion geeignet und reichert sich an Knochen an. Nach Injektion beginnt unmittelbar die Anreicherung, welche nach ca. 2 Stunden so weit fortgeschritten ist, dass ein aussagekräftiges Bild des Knochens mithilfe der Gammakamera aufgenommen werden kann.

3.1.6 Bleischürzen

Für den Vergleich von Messergebnissen mit und ohne Bleischürze kamen Schürzen der Firma Dr. Goos Suprema aus Heidelberg zum Einsatz. Bei den Schürzen handelt es sich um das Modell „SupraLight Frontschürze, SLF 26“ mit einem Bleigleichwert von 0,5 mm Pb. Laut Hersteller und DIN 6857-1 sind die Schürzen geeignet für einen Energiebereich von 50- 120 kV und entspricht der Schutzklasse 3. Es handelt sich um Leichtgewicht-Bleischürzen und entsprechen den Spannungsbereichen gem. DIN 6857-1. Die Maße der Schürzen betrugen 110 x 60 x 48 cm.

Die vom Hersteller angegebene Schutzwirkung ist in Tab. 5 dargestellt:

Röhrenspannung	50kV	75kV	100kV	120kV	150kV
Bleigleichwert mmPb	Durchgelassene Strahlung in % / (Schutzwirkung in %)				
0,25	0,35	3	10(90)	13(87)	20
0,35	0,05	1,5	5,5 (94,5)	9(91)	11
0,50	0,01	0,7	3(97)	5(95)	5,5
1,00		0,05	0,5		1

Tab. 5: Angegebene Daten des Herstellers über Schutzwirkung der verwendeten Röntgenschürzen

3.2 Methode

3.2.1 Messmethodik

Alle Dosismessungen erfolgten im Szintigrafieraum der Klinik für Pferde (Chirurgie) in Gießen über einen Zeitraum von ca. 1,5 Jahren. Im Szintigrafieraum war das „Equine Scanner H.R.“- System mit einer Deckenschienenkonstruktion angebracht. Es wurden Messungen am Personal sowie teilweise am Pferd und der Box während Skelettszintigrafien mit 33 Pferden unterschiedlicher Lahmheitsursachen durchgeführt. Davon waren 18 Teilkörperszintigrafien und 15 Ganzkörperszintigrafien. N=21 Pferde wurden vor Beginn der Szintigrafie per Maßband an drei Stellen des Rumpfes, sowie in der Körperlänge- und Widerristhöhe vermessen (vgl. Abb. 11) und alle auf einer digitalen Pferdewaage gewogen.

Das beteiligte Personal wurde vor Beginn der Aufzeichnungen mit jeweils einem Dosimeter an der linken Brusttasche des Kasacks ausgestattet (vgl. Tab. 4). Die Dosimeter wurden mit dem Federclip mit Tragerichtung nach vorne angebracht. Metallische Gegenstände wurden in unmittelbarer Nähe der Dosimeter entfernt, um Messfehler zu vermeiden. Die Bewegungsfreiheit wurde bei keinem der Personen durch das Tragen der Dosimeter beeinträchtigt. Die kumulierten Dosen wurden für die Messpunkte 1-4 und für die Messpunkte 5-7 zeitgleich abgelesen und die Zeit notiert. Daraus erfolgte anschließend die Berechnung der Dosisleistung DL in $\mu\text{Sv/h}$ bzw. $\mu\text{Sv/min}$.



Abb. 10: Anbringung Dosimeter am Personal unter und über der Schürze

Es folgte in n=10 Fällen der Vergleich mit und ohne Schürze. P1, P2 und P4 trugen zeitgleich Dosimeter unter und über einer Bleischürze. An der P3 wurde aufgrund des hohen Bewegungsaufkommens (Bücken, Laufen, Gliedmaßen aufheben) und der damit verbundenen Impraktikabilität auf eine Bleischürze verzichtet. Die Messungen sollten den normalen Ablauf der Szintigrafie nicht behindern und die Ergebnisse somit unverfälscht lassen. Der Vorgang der Injektion des Radiopharmazeutikums in den zuvor gelegten Venenkatheter in der V. jugularis sinistra oder dextra wurde separat gemessen. Nach Injektion des Radionuklids wurde das Pferd für 2 Stunden in die Box verbracht. In dieser Zeit war keine Person in unmittelbarer Nähe des Patienten. Die Messungen starteten mit Kontakt zum Patienten. P2 blieb vom Ausziehen der Gliedmaßenschoner des Patienten bis Ende der Szintigrafie am Kopf stehen. P3 entfernte die Gliedmaßenabdeckungen und half aktiv während der Szintigrafie das Pferd richtig zu positionieren, schirmte Gliedmaßen ab und fixierte die Gliedmaßen, z.B. für die Aufnahme der Hufe. P4 positionierte die Kamera und bearbeitete die Szintigramme. Eine aktive Hilfe bei Positionierung des Patienten war durch P4 in den wenigsten Fällen erforderlich.

Mit Hilfe von elastischen Binden wurden bei n= 23 Patienten Dosimeter proximo-kaudal der Skapula befestigt (MP5), bei n=19 Patienten ein weiteres kranial der Flanke (MP6).

Die Bewegungsfreiheit der Tiere war nicht eingeschränkt und keines der Tiere zeigte Abwehrbewegungen gegen die angebrachten Dosimeter. In n=25 Fällen wurden an die Außenseite der Boxentüren Dosimeter angebracht. Die Anbringung erfolgte nicht am Eisenteil der Boxen, sondern im Bereich der Holzlamellen, um die Dosisaufzeichnungen nicht zu beeinflussen (siehe Abb. 5). Die Dosimeter wurden während der Szintigrafie regelmäßig ausgelesen. Pausen, an denen das Personal keinen Kontakt zum Patienten hatte, wurden ebenfalls protokolliert und von der Gesamtzeit der Exposition abgezogen. Die Messwerte wurden vor Beginn und mit Beendigung der Pause abgelesen. Am Ende der Bildakquisition wurden die Dosimeter dem Personal abgenommen und der kumulierte Wert notiert. Die Messungen an involviertem Personal wurden bis zum Beenden der Bildaufnahmen durchgeführt. An den MP 5, 6 und 7 wurden die Messungen teilweise über 8-24 Stunden weitergeführt. Für eine GKS wurden durchschnittlich 32 Bilder mit 60 oder 90 Sekunden Aufnahmezeit angefertigt. Beschreibung der GKS - und TKS sind in Tab. 6 genau dargestellt.

Beschreibung	t	GKS	TKS vorne	TKS hinten
Zehe seitlich 90°	60	4	2	2
Zehe 0°/180°	60	2	1	1
Huf palmar/plantar	90	4	2	2
Tarsus 180°	60	1	0	1
Karpus 0°	60	1	1	0
Ellbogen und Schulter 90°	60	2	2	0
Kniegelenk und Hüfte 90°	60	2	0	2
Skapula und Widerrist 90°	60	2	2	2
kaudale HWS 90°	60	2	2	0
kraniale HWS 90°	60	2	2	0
Kopf seitlich	60	2	2	0
Kopf AP	60	1	1	0
BWS 30°	60	2	0	2
LWS 30°	60	2	0	2
Hüfte schräg	60	2	0	2
ISG dorsal	60	1	0	1
ISG schräg	60	2	0	2
Gesamtdauer		34 Min.	18 Min.	20 Min.

Tab. 6: Beschreibung der Aufnahmen für GKS, TKS vorne und hinten

3.2.2 Normierung der Werte auf 10 MBq/kg Körpergewicht (KG)

Die Dosiswerte wurden aufgrund der uneinheitlich gegebenen Aktivitäten auf eine normierte Aktivität von 10 MBq/kg KG berechnet. Die Berechnung erfolgte, indem jeder einzelne Dosiswert durch die gegebene Aktivität dividiert und mit der standardisierten Aktivität von 10 MBq/kg multipliziert wurde. Zur Beurteilung und Vergleichbarkeit mit anderen Dosismessungen war diese Normierung von entscheidender Wichtigkeit. Die normierten Werte wurden graphisch für die MP 2, 3 und 4 dargestellt. Anhand dieser Grafiken kann man die voraussichtliche Dosis in Abhängigkeit der Zeit ablesen (Abb. 12, Abb. 13, Abb. 14, Seite 44-46).

3.2.3 Berechnung des Referenzvolumens

Nach Erhebung der Körperdaten der Pferde wurde ein „Referenzvolumen“ des Rumpfes berechnet. Der Umfang U des Rumpfes wurde an drei Positionen gemessen, nämlich (1) am kaudalen Rand der Skapula, (2) in der Mitte und (3) kranial der Flanke (Abb. 11). Daraus wurden mittlere Radien r_1 , r_2 und r_3 abgeleitet ($U_i = 2 \pi * r_i$). Außerdem wurde der Abstand L_{Rumpf} zwischen Umfang U_1 und U_3 bestimmt. Daraus wurde das Referenzvolumen V_{ref} berechnet (Zusammensetzung zweier Kegelstümpfe):

$$V_{ref} = L_{Rumpf} * \frac{2}{3} \pi * (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) + (r_2^2 + r_2 r_3 + r_3^2)$$

Formel 3: Berechnung Referenzvolumen

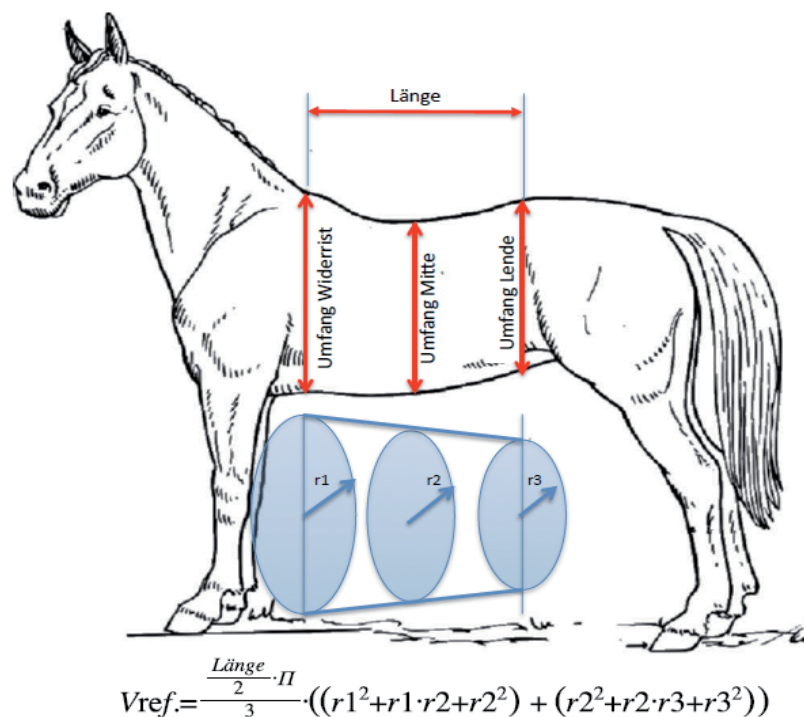


Abb. 11: Vermessungsstellen am Pferderumpf U1, U2 und U3 zur Berechnung des Referenzvolumens

3.2.4 Umfrage zum Thema Strahlenexposition in der veterinärmedizinischen Skelettszintigrafie beim Pferd

Der im eigenen Haus festgestellte Argwohn gegenüber der Szintigrafie und der damit verbundenen Strahlenbelastung führte zur Idee eine bundesweite Umfrage in Pferdekliniken, welche szintigrafische Untersuchungen bei Pferden anbieten, durchzuführen. Zur Darlegung der aktuellen Situation in deutschen Kliniken bezüglich der Skelettszintigrafie, wurden Tierärzte aus unterschiedlichen Pferdekliniken in Deutschland zum Thema Szintigrafie zur Teilnahme gebeten. Die Fragen wurden mittels Fragebogen (Template des Fragebogens siehe Seite 119) an die Teilnehmer ausgegeben. Der Inhalt der Fragen zielte auf das Thema Strahlenschutz in der equinen Skelettszintigrafie ab, zudem wurden Durchführung und Management der szintigrafischen Untersuchungen und allgemeine Fragen über Fallzahlen und Patientengut gestellt. Dabei sollte vor allem eruiert werden, wie oft und wie lange das Personal bei szintigrafischen Untersuchungen anwesend ist. Daraus sollten Rückschlüsse auf die zu erwartende Strahlenexposition pro Jahr und Person geschlossen werden.

Die Beantwortung der Fragen erfolgte anonym über einen Web-Link. Pro Teilnehmer konnte nur ein Fragebogen ausgefüllt werden. Der Fragebogen wurde online verschickt und enthielt 24 Fragen. Die Antwortmöglichkeiten konnten in vorgegebenen Antwortfeldern angeklickt werden, zudem konnten in einem Zusatzfeld individuelle Anmerkungen gemacht werden.

3.2.5 Statistische und graphische Auswertung

Zur Berechnung der Fallzahl wurde anhand der Genauigkeit der Mittelwertschätzung das Programm „BiAS“ = biometrische Analyse von Stichproben verwendet (Ackermann 1997). Die Auswertung der Messdaten erfolgte unter Anleitung der Arbeitsgruppe Biomathematik und Datenverarbeitung des Fachbereichs Veterinärmedizin der Justus-Liebig-Universität in Gießen. Es wurde mit dem Statistik-Programmpaket „BMDP/Dynamics, Release 8.1“ der Firma Statistical Solutions Ltd aus Irland (Dixon 1993) im lokalen Rechnernetzwerk des Fachbereichs Veterinärmedizin der Justus-Liebig-Universität Gießen gearbeitet. Zur allgemeinen Datenbeschreibung wurden das Programm BMDP1D verwendet. Für die Messpunkte 1 bis 16 und die jeweiligen Dosisleistungen wurden der arithmetische Mittelwert (\bar{x}), die Standardabweichung (s), der Standardfehler des Mittelwertes, der Variationskoeffizient, die Minima ($x_{\min.}$), Maxima ($x_{\max.}$) und die Spannweite der Messungen berechnet. Für die detaillierte Datenbeschreibung wurde das Programm BMDP2D verwendet und der 95% Konfidenzintervall für Mittelwerte berechnet. Mit BMDP3D wurden verschiedene Messpunkte mit Dosisleistung pro Stunde verglichen und mittels t-Test für abhängige Stichproben gegenübergestellt. Die errechneten p-Werte wurden auf Ihre statistische Signifikanz p geprüft und auf zwei Stellen nach dem Komma gerundet und mit maximal vier Stellen nach dem Komma angegeben. Bei der Bewertung der statistischen Signifikanz wurde das Signifikanzniveau auf $\alpha = 0,05$ zugrunde gelegt; d.h. alle Ergebnisse mit $p \leq 0,05$ wurden als statistisch signifikant angesehen. Mittels BMDP6D wurden Korrelationsdiagramme der zuvor festgelegten Vergleichspunkte erstellt.

3.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind im Folgenden unter anderem in Boxplots dargestellt. Die Boxen werden gebildet durch das obere und untere Quartil (25% und 75%-Quantil). Der Querstrich in den Boxen gibt den Medianwert an, die „Whiskers“ geben den Minimal- und Maximalwert an. Die Angabe der Messdaten erfolgt grundsätzlich mit Originalmesswerten und mit normierten Werten auf 10 MBq/kg KG.

Die in Abb. 12, 13 und 14 dargestellten Grafiken zeigen die auf 10 MBq/kg KG normierten Dosisleistungen an MP2, 3 und 4 in Abhängigkeit der Zeit. Die eingezeichneten Regressionsgeraden können zur Dosisabschätzung der jeweiligen Messpositionen nach einer Zeit x herangezogen werden.

3.3.1 Auswertung MP1

Die im Mittel gemessene Exposition der MP1 betrug 11,5 μSv , die DL1 betrug 123,4 $\mu\text{Sv/h}$. An dieser Messposition wurden die größten Schwankungen festgestellt, minimal 3 μSv , maximal 20 μSv . Die Standardabweichung des Mittelwertes betrug 4,3, der Standardfehler des Mittelwertes S.E.M. 0,78 und der Variationskoeffizient VK betrug 0,38. Die Messergebnisse sind in Tab. 7, sowie in Tab. 21: Messdaten Patient Nr. 01 bis Tab. 53: Messdaten Patient Nr. 33 im Anhang aufgeführt.

Die Korrelation zwischen der Zeit in Minuten und der kumulierten Dosis in μSv betrug 0,235, der P-Wert betrug 0,202.

MP1																																		
PNr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
Summe [μSv]	17	13	14	20	*	13	14	9	8	11	8	3	7	11	10	11	5	20	17	17	6	12	*	9	15	9	5	12	14	12	7	9	16	11
Zeit t in Min.	5	6	5	8	*	5	5	5	5	5	5	5	5	7	7	5	4	7	5	5	4	5	*	10	6	7	5	7	5	6	5	6	5	6
DL1 [$\mu\text{Sv/h}$]	204	130	168	150	*	156	168	108	96	132	96	36	84	94	86	132	75	171	204	204	90	144	*	54	150	77	60	103	168	120	84	90	192	123

Tab. 7: Messdaten der Patienten 1 - 33 an MP1

3.3.2 Auswertung Zeitdauer

Die durchschnittliche Zeit für eine Ganzkörperszintigrafie (GKS) betrug 92 Minuten, für eine Teilkörperszintigrafie (TKS) 62 Minuten (siehe Tab. 8). Das ergibt bei einer GKS

mit ca. 34 Bildern á 60 Sekunden und 4 x 90 Sekunden Belichtungszeit eine kumulierte Aufnahmezeit von 36 Minuten. Bei einer TKS mit ca. 18 Bildern á 60 Sekunden und 2 x 90 Sekunden ergibt sich eine kumulierte Aufnahmezeit von ca. 19 Minuten. Bei einer GKS beträgt die Bildakquisition 38 % der Gesamtzeit, 62% wurde für die Positionierung des Patienten benötigt. Bei einer TKS entfielen 31 % der gebrauchten Zeit für die Bildakquisition, fast dreiviertel der Zeit wurde mit Positionierung und Kameraeinstellungen verbracht. Die Auswertung der externen Umfrage ergab eine durchschnittliche Zeitdauer für die GKS von 113 Minuten, 54 % der Befragten gaben eine Untersuchungszeit von 90 Minuten an. Für TKS wurden im Mittel insgesamt 69 Minuten benötigt.

Die durchschnittlich gebrauchte Zeit an MP1 zur Aufarbeitung des Eluates dauerte nach Entgegennahme im Schnitt 6 Minuten im Heißlabor. Das Anreichen in einer Papierschale bis zur Injektion und Nachinjektion mit NaCl dauerte 30-45 Sekunden.

<i>Pat. Nr.</i>	GanzkörperSZ in Min.	<i>Pat. Nr.</i>	TeilkörperSZ in Min.
1	96	9	60
2	88	10	79
3	85	11	60
4	62	12	50
5	76	13	85
6	71	14	85
7	90	15	54
8	94	16	40
24	106	17	65
25	116	18	60
26	109	19	51
28	105	20	50
30	126	21	40
31	98	22	55
33	60	23	89
		27	65
		29	70
		32	58
Ø	92		62

Tab. 8: Dauer in Minuten für GKS und TKS der Patienten 1 - 33

3.3.3 Auswertung MP2 und MP3

Bei der Durchführung von n= 15 GKS wurde P2 im Mittel mit 41 µSv exponiert, bei TKS (n= 18) mit 28 µSv, die DL2 27,4 betrug µSv/h. Der Minimalwert betrug 20 µSv,

maximal wurden 57 μSv gemessen. Die Standardabweichung des Mittelwertes betrug 10,2, der Standardfehler des Mittelwertes S.E.M. 1,77 und der Variationskoeffizient VK betrug 0,3 μSv . Nach Normierung der Werte auf 10 MBq/kg KG betrug der Durchschnittswert 31 $\mu\text{Sv/GKS}$, 23 $\mu\text{Sv/TKS}$, die Dosisleistung betrug 22 $\mu\text{Sv/h}$. Die Messergebnisse sind in Abb. 12, sowie in Tab. 9 und Tab. 10 aufgeführt.

Die Korrelation zwischen der Zeit t in Minuten und der kumulierten, auf 10 MBq/kg KG normierten Dosis in μSv , betrug 0,637, der P-Wert betrug $< 0,001$.

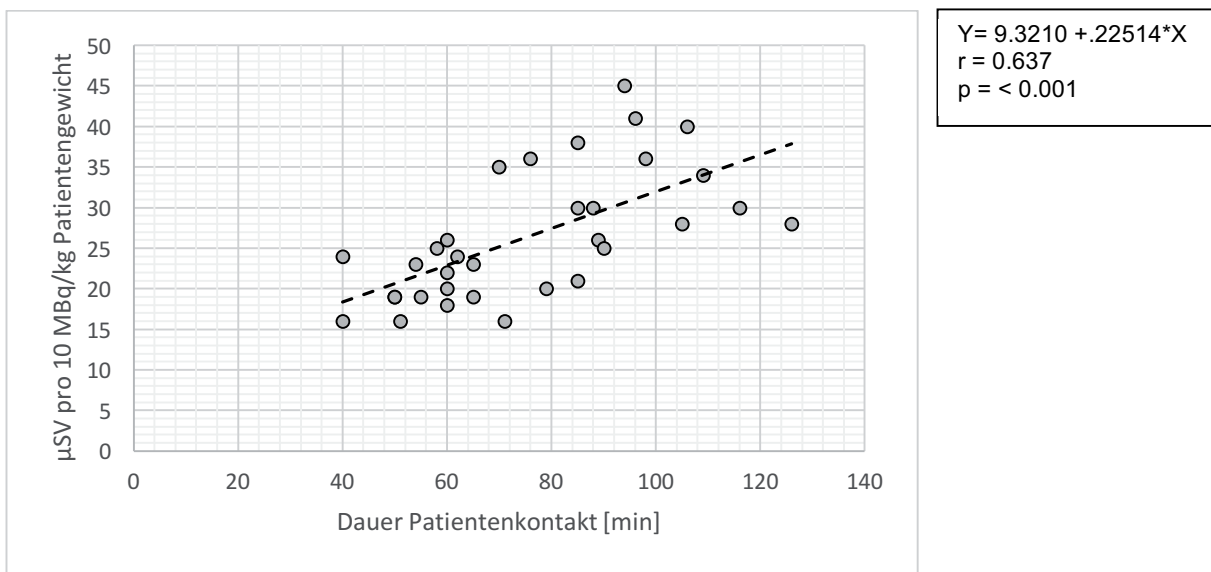


Abb. 12: Dosis MP2 mit normierten Werten in Abhängigkeit der Zeit

P3 wurde bei $n=15$ GKS im Mittel mit einer Dosis von 36 μSv und während $n=18$ TKS mit 23 μSv exponiert. Die DL3 betrug 24,4 $\mu\text{Sv/h}$. Der Minimale Wert betrug 12 μSv , der maximale Wert 57 μSv . Die Standardabweichung des Mittelwertes betrug 9,8, der Standardfehler des Mittelwertes S.E.M. 1,71 und der Variationskoeffizient VK betrug 0,34 μSv . Nach Normierung der Werte auf 10 MBq/kg KG betrug der Durchschnittswert 28 $\mu\text{Sv/GKS}$, 19 $\mu\text{Sv/TKS}$ und die Dosisleistung betrug 19 $\mu\text{Sv/h}$. Die Messergebnisse sind in Abb. 13, sowie in Tab. 9 und Tab. 10 aufgeführt.

Die Korrelation zwischen der Zeit t in Minuten und der kumulierten, auf 10 MBq/kg KG normierten Dosis an MP3 in μSv betrug 0,460, der P-Wert betrug 0,007.

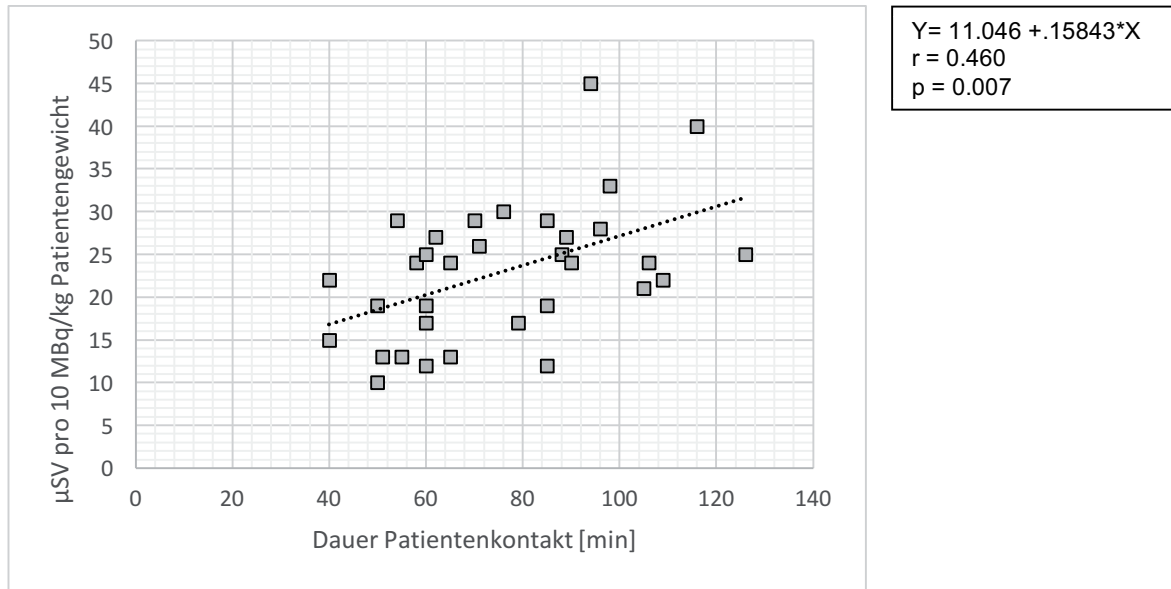


Abb. 13: Dosis MP3 mit normierten Werten in Abhängigkeit der Zeit

3.3.4 Auswertung MP4

P4 wurde bei je einer TKS und GKS nicht dosimetrisch überwacht. Somit ergab die Auswertung bei MP4 für n = 14 GKS eine Dosis von 7,0 µSv und für n=17 TKS eine Dosis von 4,1 µSv. Minimal wurden 2 µSv, maximal 14 µSv ermittelt. Die gemittelte Dosisleistung DL4 ergab einen Wert von 4,4 µSv/h. Die Standardabweichung des Mittelwertes betrug 2,5, der Standardfehler des Mittelwertes S.E.M. 0,45 und der Variationskoeffizient VK betrug 0,46. Nach Normierung der Werte auf 10 MBq/kg KG betrug der Durchschnittswert 5 µSv/GKS, 3 µSv/TKS, die Dosisleistung betrug 3 µSv/h.

Die Korrelation zwischen der Zeit t in Minuten und der kumulierten, auf 10 MBq/kg KG normierten Dosis in µSv, betrug 0,595, der P-Wert betrug < 0,001.

Ergebnisse

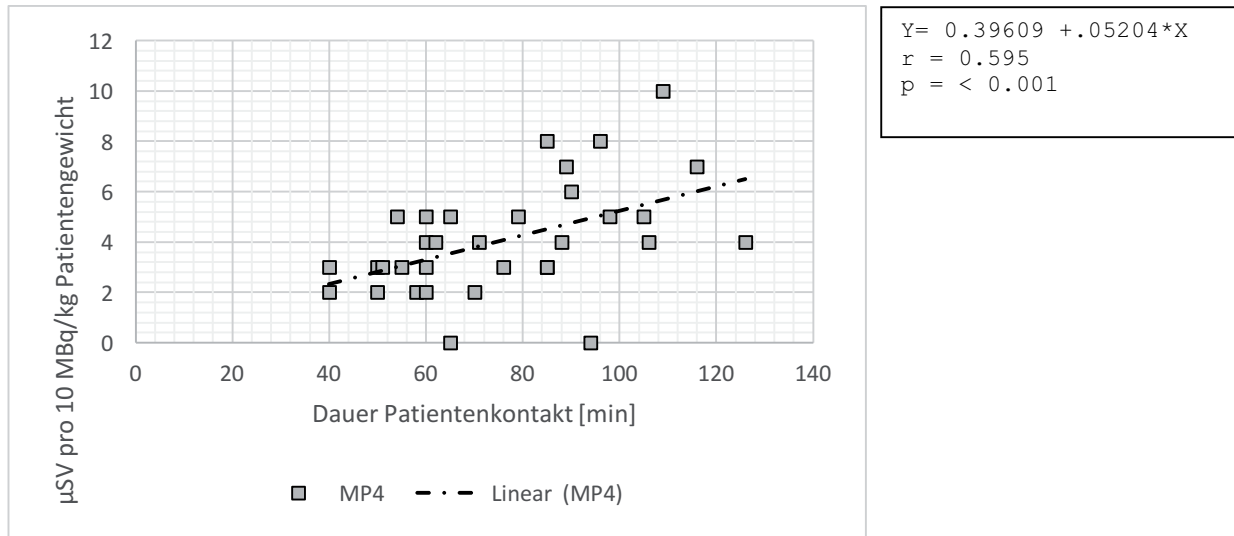


Abb. 14: Dosis MP4 mit normierten Werten in Abhängigkeit der Zeit

MP4 maß, wie oben beschrieben, die Dosis während der Injektion und mit Beginn der Szintigrafie (2h p.i.) die kumulierte Dosis während der Aufnahmen. Die höchste Dosisleistung während der Injektion betrug ca. 60 µS/h. Wegen der kurzen Dauer der Injektion ergibt sich daraus eine Dosis von 1 µSv. Die Messergebnisse sind in Tab. 9 und Tab. 10 aufgeführt. Abb. 14 zeigt die einzelnen Dosiswerte, normiert auf applizierte Aktivitäten von 10 MBq/kg KG und die zugehörige Regressionsgerade. Anhand dieser Grafik kann eine grobe Abschätzung für die Exposition an MP4 erfolgen.

Ergebnisse

MP2				MP3				MP4			
Summe [μSv]	norm. auf 10 MBq/kg	Zeit (min.)	norm. DL2	Summe [μSv]	norm. auf 10 MBq/kg	Zeit (min.)	norm. DL3	Summe [μSv]	norm. auf 10 MBq/kg	Zeit (min.)	norm. DL4
46	41	96	26	32	28	96	18	9	8	96	5
38	30	88	20	31	25	88	17	5	4	88	3
37	30	85	21	36	29	73	24	10	8	85	6
39	24	62	23	43	27	62	26	6	4	62	4
42	36	76	28	35	30	76	24	4	3	76	2
23	16	71	14	38	26	71	22	6	4	71	3
37	25	90	17	28	24	90	16	7	6	90	4
57	45	94	29	57	45	94	29	*	*	*	*
37	26	60	26	35	25	45	33	4	3	60	3
29	20	79	15	24	17	79	13	7	5	79	4
31	18	60	18	21	12	60	12	4	2	60	2
24	19	50	23	24	19	50	23	3	2	50	2
39	38	85	27	20	19	85	13	3	3	85	2
25	21	85	15	14	12	85	8	4	3	85	2
26	23	54	26	32	29	54	32	5	5	54	6
21	16	40	24	19	15	40	23	2	2	40	3
23	19	65	18	16	13	65	12	*	*	*	*
23	20	60	20	20	17	60	17	6	5	60	5
22	16	51	19	19	13	51	15	4	3	51	4
23	19	50	23	12	10	50	12	4	3	50	4
31	24	40	36	29	22	40	33	4	3	40	5
20	19	55	21	14	13	55	14	3	3	55	3
25	26	89	18	26	27	89	18	7	7	89	5
52	40	106	23	31	24	106	14	5	4	106	2
31	30	116	16	41	40	116	21	7	7	116	4
47	34	109	19	30	22	109	12	14	10	109	6
25	23	65	21	26	24	65	22	5	5	65	5
44	28	105	16	33	21	105	12	8	5	105	3
48	35	70	30	40	29	70	25	3	2	70	2
47	28	126	13	41	25	126	12	7	4	126	2
38	36	98	22	35	33	98	20	5	5	98	3
27	25	58	26	26	24	58	25	2	2	58	2
32	22	60	22	28	19	60	19	6	4	60	4
34	26	76	22	29	23	76	19	5	4	76	3

*Tab. 9: Dosis u. Dosisleistung aller Patienten für MP2, MP3 u. MP4.
Originalwerte u. auf 10 MBq/kg KG normierte Werte*

	MP2				MP3				MP4			
	Summe [μSv]	Summe normiert [μSv]	DL2 [μSv/h]	DL2 normiert [μSv/h]	Summe [μSv]	Summe normiert [μSv]	DL3 [μSv/h]	DL3 normiert [μSv/h]	Summe [μSv]	Summe normiert [μSv]	DL4 [μSv/h]	DL4 normiert [μSv/h]
GKS	41	31	27	22	36	28	24	19	7	5	4	3
TKS	28	23			23	19			4	3		

*Tab. 10: Für GKS und TKS Dosis u. Dosisleistung für MP2-MP4.
Originalwerte u. auf 10 MBq/kg KG normierte Werte*

3.3.5 Auswertung MP 5 und MP6

Am Patienten wurde unmittelbar nach Injektion des Radiopharmazeutikums mit der Dosisaufzeichnung an MP5 und MP6 begonnen. Zwei Stunden post injectionem (Startzeitpunkt Szintigrafie und somit Herantreten an den Patienten) ergab sich an MP5 ein Dosismittelwert von 294 μSv mit einer gemittelten Dosisleistung DL5 von 145 μSv/h.

In den nachfolgenden Ablesungen 4,6 und 12 h p.i. reduzierte sich die Dosisleistung nach 4 h um 22,2 %, nach 6 h um 16,8 % und nach 12 h um weitere 33%. Laut berechneter Liste in Tab. 13: Zerfall von Tc99m auf Seite 15, ist Tc nach 12 h zu 75% zerfallen. Die Messwerte bei MP6 ergaben 2 h p.i. einen Mittelwert von 277 μSv und eine Dosisleistung DL6 von 137 $\mu\text{Sv/h}$. 4 h nach Injektion betrug die kumulierte Dosis 413 μSv , die Dosisleistung 104 $\mu\text{Sv/h}$, nach 6 h betrug die kumulierte Dosis 513 μSv und die Dosisleistung 86 $\mu\text{Sv/h}$. Nach 12 h sank die DL auf einen Mittelwert von 56 $\mu\text{Sv/h}$. Somit reduzierte sich die DL nach 12 h um 76% auf restliche 24%. Die kumulierten Werte wurden an MP5 und MP6 jeweils nach 2,4,6 und 12 h protokolliert und sind in Tab. 11 und Tab. 12 jeweils in den Intervallen 0-2 h p.i., 2-4 h p.i., 4-6 h p.i. und 6-12 h p.i. übersichtlich aufgeführt. Die Werte wurden ebenso genormt auf eine Standardaktivität von 10 MBq/kg KG.

Die grafische Darstellung der Messdaten der MP 5 und MP6 erfolgte anhand von Boxplots (Abb.15).

Ergebnisse

MP5 (~2h p.i.)			MP5' (~4h p.i.)			MP5" (~6h p.i.)			MP5''' (~12 h p.i.)		
Summe [DSv]	norm. auf 10 MBq/kg	norm. DL5 [DSv/h]	Summe [DSv]	norm. auf 10 MBq/kg	norm. DL5' [DSv/h]	Summe [DSv]	norm. auf 10 MBq/kg	norm. DL5" [DSv/h]	Summe [DSv]	norm. auf 10 MBq/kg	norm. DL5''' [DSv/h]
243	215	102	354	313	79	430	381	70	558	494	44
263	210	103	374	299	76	476	381	68	658	526	45
291	233	112	428	342	86	533	426	71	735	588	50
345	213	106	542	335	80	644	398	66	857	529	43
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
344	237	121	525	362	82	661	456	81	*	*	*
330	287	143	499	434	108	622	541	93	826	718	63
324	255	128	498	392	101	673	530	87	814	641	62
345	243	121	558	393	91	729	513	73	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
433	247	124	555	317	100	772	441	66	*	*	*
265	214	107	363	293	84	527	425	62	646	521	44
261	239	114	387	355	90	454	417	70	*	*	*
291	249	101	383	327	82	487	416	65	631	539	44
148	133	64	337	304	66	389	350	63	631	568	45
266	205	102	413	318	72	488	375	62	660	508	41
295	240	120	409	333	91	524	426	74	*	*	*
237	201	100	343	291	81	517	438	60	655	555	49
272	192	96	393	277	80	529	373	65	701	494	47
341	277	139	564	459	96	617	502	92	904	735	57
396	305	135	537	413	110	610	469	78	*	*	*
212	198	99	351	328	74	411	384	66	*	*	*
237	247	110	331	345	86	*	*	*	*	*	*
246	189	95	366	282	70	*	*	*	629	484	37
281	270	135	439	422	106	532	512	85	686	660	65
290	212	101	463	338	82	*	*	*	823	601	45
220	204	102	*	*	*	*	*	*	*	*	*
295	190	114	545	352	92	623	402	67	*	*	*
359	266	133	507	376	100	615	456	83	*	*	*
410	246	123	612	366	92	768	460	77	1020	611	56
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
294	229	113	447	347	87	568	436	73	731	575	49

*Tab. 11: Dosis und Dosisleistung aller Patienten im Zeitverlauf
von 2 bis 12 h p.i. für MP5.
Originalwerte und auf 10 MBq/kg KG normierte Werte*

Ergebnisse

MP6 (~2h p.i.)			MP6' (~4h p.i.)			MP6'' (~6hp.i.)			MP6''' (~12hp.i.)		
Summe [DSv]	norm. auf 10 MBq/kg	norm. DL6 [DSv/h]	Summe [DSv]	norm. auf 10 MBq/kg	norm. DL6' [DSv/h]	Summe [DSv]	norm. auf 10 MBq/kg	norm. DL6'' [DSv/h]	Summe [DSv]	norm. auf 10 MBq/kg	norm. DL6''' [DSv/h]
233	206	98	327	289	73	397	351	64	513	454	41
245	196	96	335	268	68	413	330	59	571	457	39
300	240	115	428	342	86	512	410	68	697	558	47
345	213	106	582	359	86	685	423	70	919	567	46
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
391	270	137	505	348	79	625	431	76	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
402	230	115	524	299	95	807	461	69	*	*	*
230	185	93	309	249	72	434	350	51	534	431	37
260	239	114	361	331	84	448	411	69	*	*	*
289	247	100	378	323	81	468	400	63	603	515	42
234	211	101	457	412	90	503	453	81	721	650	51
276	212	106	410	315	71	472	363	60	613	472	38
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
168	157	79	272	254	58	313	293	50	*	*	*
224	233	104	224	233	58	*	*	*	*	*	*
291	224	112	432	332	83	*	*	*	724	557	43
309	297	149	525	505	126	600	577	96	733	705	70
286	209	99	430	314	76	*	*	*	753	550	42
242	224	112	*	*	*	*	*	*	*	*	*
271	175	110	518	334	87	*	*	*	*	*	*
275	204	102	408	302	81	503	373	68	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
277	220	108	413	323	81	513	402	67	671	538	45

Tab. 12: Dosis und Dosisleistung aller Patienten im Zeitverlauf von 2 bis 12 h p.i. für MP6. Originalwerte und auf 10 MBq/kg KG normierte Werte

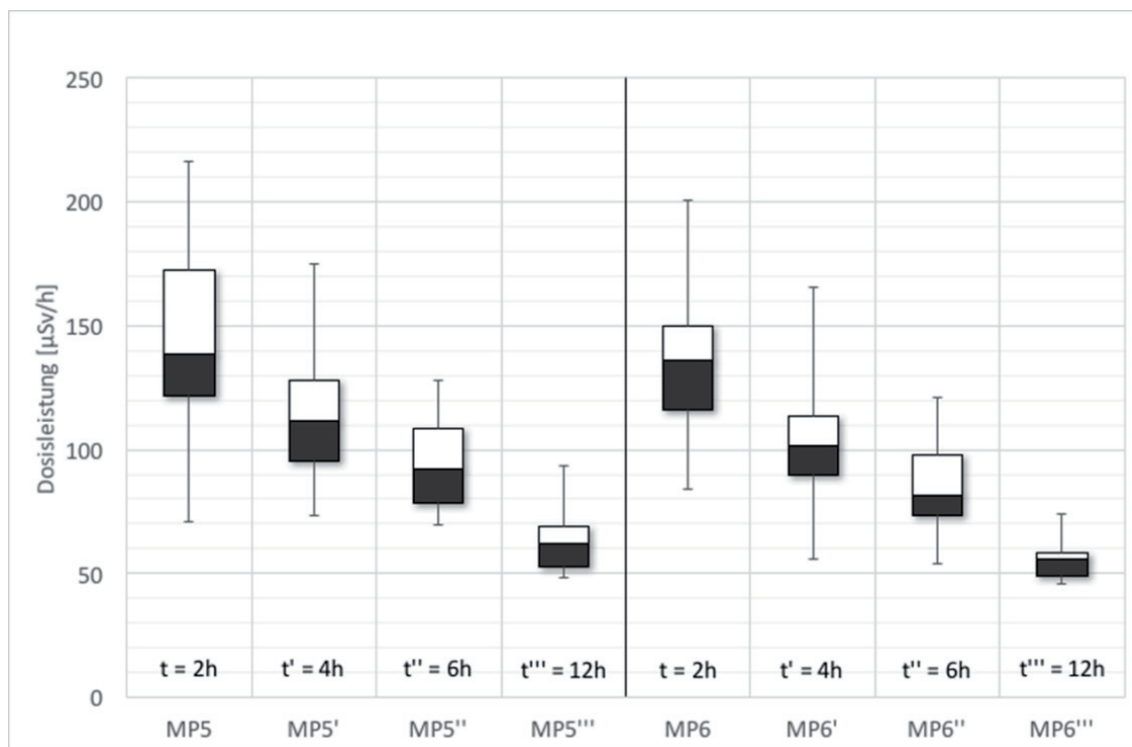


Abb.15: MP5 und MP6 im Zeitverlauf 2,4,6, und 12 h p.i.

Tc 99m HWZ von 6,01 h	
Stunden	Verbleibende Menge in %
0	100
6,01	50
12,02	25
18,03	12,5
24,04	6,25
30,05	3,12
36,06	1,56
42,07	0,78
48,08	0,4
54,09	0,2
60,1	0,1
66,11	0,05
72,12	0,025

Tab. 13: Zerfall von Tc99m

3.3.6 Auswertung MP7

Die Dosis bei MP7 wurde ebenfalls nach 2, 4, 6 und 12 h abgelesen. Zu beachten ist, dass die Pferde im Zeitraum 2 h p.i. für die Dauer der Szintigrafie nicht in der Box standen. 2 h nach Injektion ergab der kumulierte Wert in Mittel 23 µSv, die DL7 betrug

Ergebnisse

11 $\mu\text{Sv/h}$. Nach 4 h stieg die kumulierte Dosis auf 36 μSv , die Dosisleistung DL7 sank auf 9 $\mu\text{Sv/h}$. Nach 6 h konnte wieder ein Anstieg auf 11 $\mu\text{Sv/h}$ verzeichnet werden, nach 12 h sank die DL7 auf 10 $\mu\text{Sv/h}$. Die Messergebnisse sind in Tab. 14 zusammengefasst und in den Tab. 21 bis Tab. 53 im Anhang aufgeführt. Die grafische Darstellung der Messwerte der MP7 erfolgte anhand von Boxplots (Abb. 16).

MP7 (~2h p.i.)			MP7' (~4h p.i.)			MP7'' (~6h p.i.)			MP7''' (~12h p.i.)		
Summe [DSv]	norm. auf 10 MBq/kg	norm. DL7 [DSv/h]	Summe [DSv]	norm. auf 10 MBq/kg	norm. DL7' [DSv/h]	Summe [DSv]	norm. auf 10 MBq/kg	norm. DL7'' [DSv/h]	Summe [DSv]	norm. auf 10 MBq/kg	norm. DL7''' [DSv/h]
21	19	9	39	35	9	67	59	11	135	119	11
24	19	9	41	33	8	78	62	11	150	120	10
11	9	4	18	14	4	38	30	5	81	65	6
23	14	7	26	16	4	44	27	5	108	67	5
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
13	9	5	36	25	5	36	25	4	72	50	4
19	17	8	25	22	5	31	27	5	123	107	9
26	20	10	41	32	8	69	54	9	115	91	9
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
46	26	13	47	27	8	86	49	7	*	*	*
23	19	9	38	31	9	72	58	8	104	84	7
34	31	15	*	*	*	96	88	15	*	*	*
34	29	12	46	39	10	74	63	10	120	103	8
26	23	11	36	32	7	52	47	8	120	108	9
13	10	5	54	42	9	83	64	10	161	124	10
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
20	17	8	34	29	8	85	72	10	*	*	*
18	13	6	41	29	9	83	58	10	130	92	9
21	17	9	46	37	8	54	44	8	119	97	8
45	35	15	*	*	*	*	*	*	*	*	*
18	17	8	*	*	*	*	*	*	*	*	*
11	11	5	16	17	4	*	*	*	*	*	*
18	14	7	38	29	7	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
20	15	7	26	19	5	*	*	*	98	72	5
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
32	24	12	43	32	8	71	53	9	112	83	7
24	14	7	*	*		*	*	*	*	*	
*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	
*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	
*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	
23	18	9	36	28	7	66	52	9	117	92	8

Tab. 14: Dosis und Dosisleistung aller Patienten im Zeitverlauf von 2 bis 12 h p.i. für MP7. Originalwerte und auf 10 MBq/kg KG normierte Werte

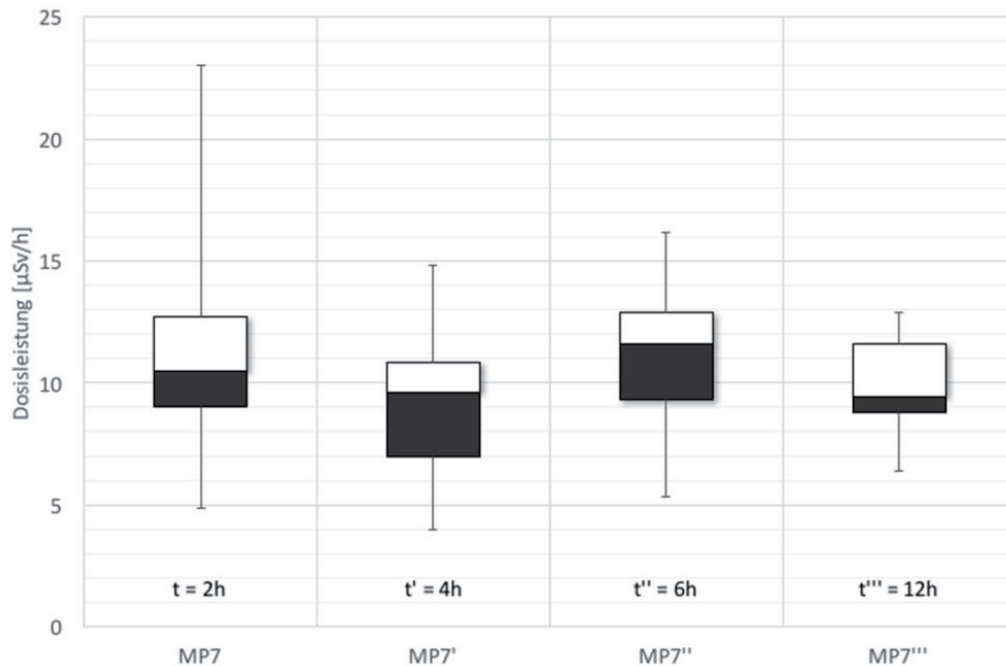


Abb. 16: MP7 2,4,6 und 12 h p.i.

3.3.7 Vergleiche MP 2 mit MP3

MP2 und MP3 wurden mittels t-Test für abhängige Stichproben verglichen, da diese beiden Personen P2 und P3 am Pferd gearbeitet haben. Es sollte eine Aussage über die Zufälligkeit der Ergebnisse getroffen werden. In Tab. 14 sind die gemittelten Dosiswerte für MP2 und MP3 für GKS und TKS aufgeführt, P2 wurde sowohl bei GKS als auch TKS höher exponiert als P3. Es wurde ein p-Wert von 0,0082 ermittelt. Dieser Wert liegt unterhalb von 0,05 und wird somit als statistisch signifikant bezeichnet. Somit wurde bewiesen, dass die Werte nicht zufällig geringfügig auseinanderliegen, sondern eine statistische aussagekräftige Differenz aufweisen. Das dazugehörige Korrelationsdiagramm in Abb.18: Korrelation von DL2 und DL3 spiegelt diese Aussage grafisch wider. Abb. 17 zeigt, dass die Dosis an MP2 sowohl mit originalen Messdaten, als auch mit normierten Werten höher ist als an MP3.

Ergebnisse

MP2		MP3		MP2 (norm.)		MP3 (norm.)	
GKS [μSv]	TKS [μSv]	GKS [μSv]	TKS [μSv]	GKS [μSv]	TKS [μSv]	GKS [μSv]	TKS [μSv]
46	37	32	35	41	26	28	25
38	29	31	24	30	20	25	17
37	31	36	21	30	18	29	12
39	24	43	24	24	19	27	19
42	39	35	20	36	38	30	19
23	25	38	14	16	21	26	12
37	26	28	32	25	23	24	29
57	21	57	19	45	16	45	15
52	23	31	16	40	19	24	13
31	23	41	20	30	20	40	17
47	22	30	19	34	16	22	13
44	23	33	12	28	19	21	10
47	31	41	29	28	24	25	22
38	20	35	14	36	19	33	13
32	25	28	26	22	26	19	27
	25		26		23		24
	48		40		35		29
	27		26		25		24
41	28	36	23	31	23	28	19

Tab. 15: Dosiswerte MP2 u. MP3 unterteilt in GKS und TKS
(originale und auf 10 MBq/kg KG gemittelte Werte)

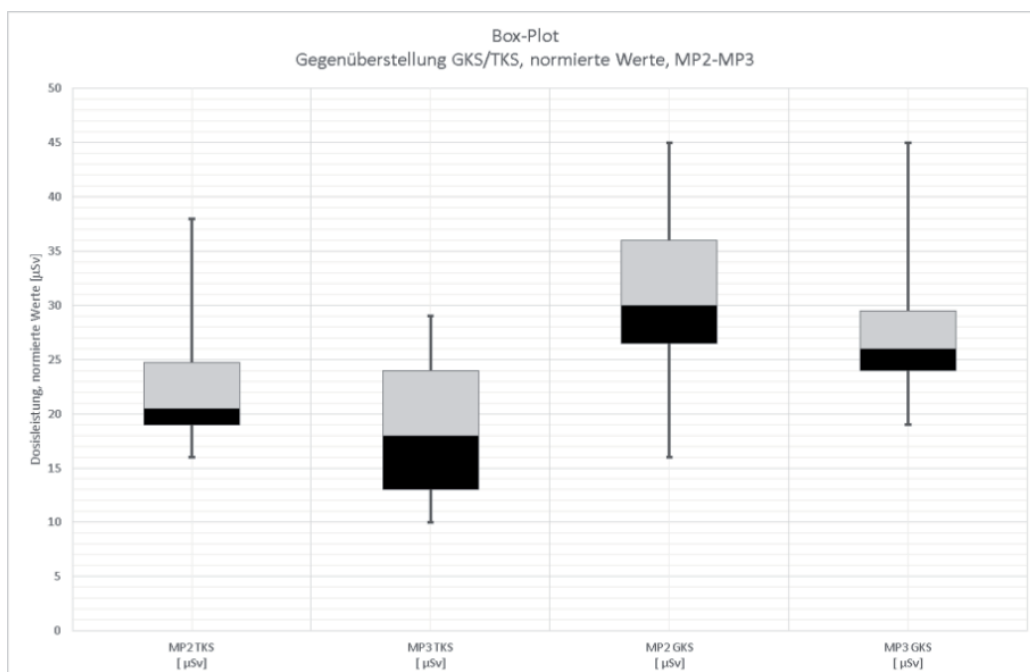


Abb. 17: Dosiswerte bei MP2 und MP3 für GKS und TKS

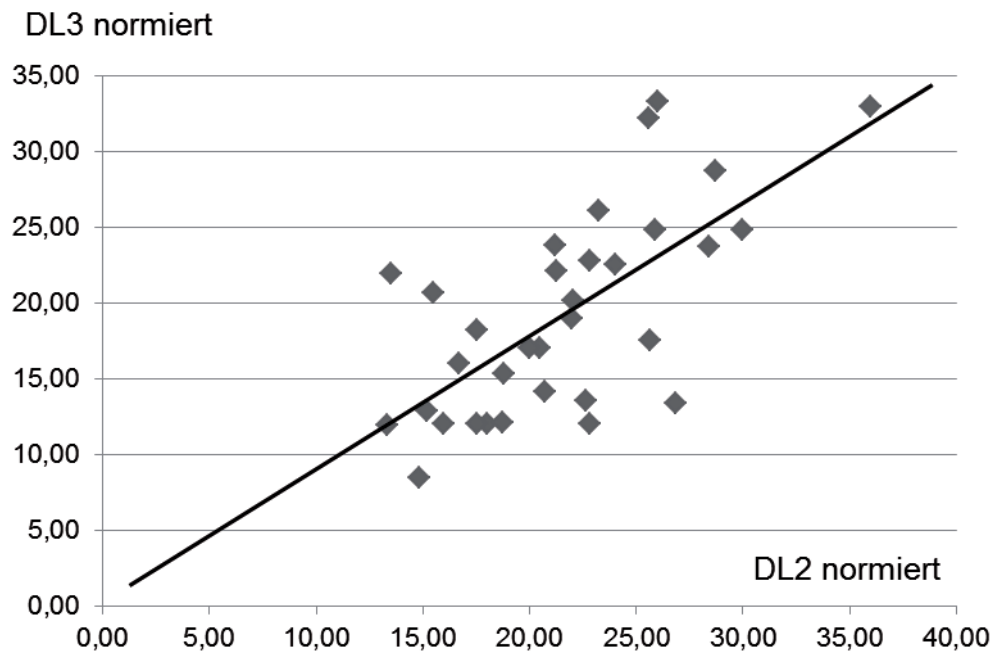


Abb.18: Korrelation von DL2 und DL3

3.3.8 Vergleich mit und ohne Schürze an MP1, MP2 und MP4

Zusätzlich zu den normalen Messungen wurden $n = 10$ Vergleichsmessungen mit und ohne Verwendung einer Bleischürze mit einem Bleigleichwert von 0,5 mm an MP 1, MP2 und MP4 durchgeführt. In den Abb. 19, 20 und 21 sind die DLs von MP1, MP2 und MP4 jeweils mit und ohne Bleischürze gegenübergestellt. Die Messungen an MP1 ergaben eine Dosisreduktion von 69%, die durchschnittliche Dosisleistung konnte von 192 $\mu\text{Sv/h}$ auf 59 $\mu\text{Sv/h}$ reduziert werden, entsprechend einem Dosisreduktionsfaktor (DRF) von 3,2.

An MP 2 ergab sich ebenfalls eine Dosisreduktion von 68 % mit der Schürze. Die mittlere DL wurde von 16,6 $\mu\text{Sv/h}$ auf 5,4 $\mu\text{Sv/h}$ gesenkt und entspricht damit einem DRF von 3,1.

An MP4 wurde eine Dosisreduktion von 69% ermittelt. Die gemittelte DL wurde von 3,9 $\mu\text{Sv/h}$ auf 1,2 $\mu\text{Sv/h}$ gesenkt, entsprechend einem DRF von 3,3.

In Tab.16 sind die Vergleichsmessungen mit und ohne Bleischürze tabellarisch dargestellt. „Ohne S“ bedeutet über der Schürze gemessen, „mit S“ unter der Schürze.

Ergebnisse

		MP1						MP2					MP4				
Art	PNr	Zeit [min]	mit S [DSv]	ohne S [DSv]	DL1 mit S [DSv/h]	DL 1 ohne S [DSv/h]	Zeit [min]	mit S [DSv]	ohne S [DSv]	DL2 [DSv/h]	DL2 ohne S [DSv/h]	Zeit [min]	mit S [DSv]	ohne S [DSv]	DL4 mit S [DSv/h]	DL4 ohne S [DSv/h]	
3	1	005	2	5	22	60	075	7	23	6	20	075	1	5	1	4	
1	2	006	6	14	58	150	116	8	30	4	16	116	2	7	1	4	
3	3	006	3	14	28	150	071	11	25	10	22	071	4	8	3	7	
1	4	*	*	*	*	*	125	11	19	5	10	125	2	7	1	3	
1	5	015	8	63	32	256	145	16	47	7	19	145	4	11	2	5	
1	6	*	*	*	*	*	125	9	31	4	16	125	2	6	1	3	
1	7	006	10	35	100	390	100	6	25	4	16	100	2	3	1	2	
1	8	007	14	27	122	240	106	7	29	4	17	106	1	4	1	2	
1	9	*	*	*	*	*	130	10	27	5	14	130	3	12	2	6	
3	10	008	3	12	54	98	080	7	19	5	16	080	1	4	1	3	
Mittelwe		008	6	24	59	192	107	9	27	5	17	107	2	6	1	4	

Tab.16: Ergebnisse Vergleich mit und ohne Bleischürze MP1, MP2 und MP4 normierte Werte auf 10 MBq/kg KG

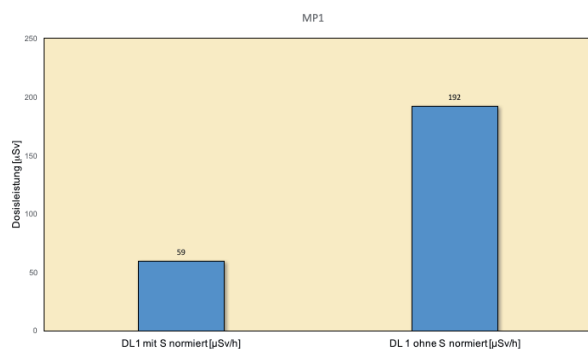


Abb. 19: Vergleich DL1 mit und ohne Bleischürze

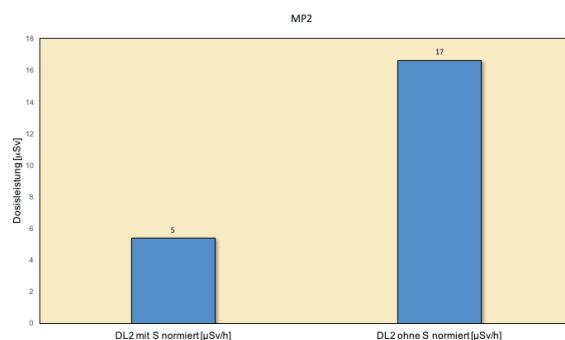


Abb. 20: Vergleich DL2 mit und ohne Bleischürze

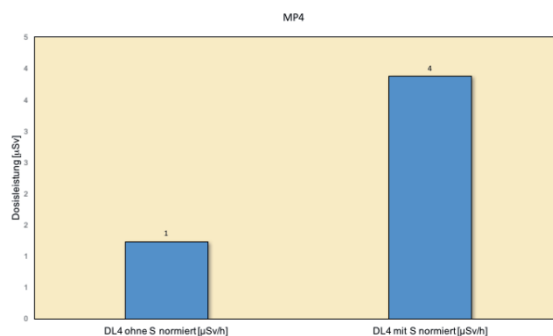


Abb. 21: Vergleich DL4 mit und ohne Bleischürze

3.3.9 Prüfung auf Korrelation zwischen DL2 und DL5 und der Körperkonstitution der Patienten mit den Parametern Gewicht, Kaliber und Referenzvolumen

Die Berechnung erfolgte durch Messungen des Umfanges des Rumpfes an zuvor festgelegten Stellen. Der Pferderumpf wurde an drei Stellen im Umfang vermessen (Abb. 11) und die Länge vom kranialen Messumfang bis zum kaudalen Messumfang notiert. In Tab. 54 (Anhang) sind die Werte nochmals zusammengefasst dargestellt. Es wurde anhand der Formel 3 das Referenz-Volumen berechnet (siehe Kapitel 3.2.3). Das kleinste Volumen waren 129 dm^3 , das größte 274 dm^3 . Die DL2 und DL5 wurden mit dem Gewicht (Abb. 22, Abb. 23), dem Kaliber (Abb. 24, Abb. 25) und dem Referenzvolumen (Abb. 26, Abb. 27) korreliert. DL2 korrelierte schwach mit den Parametern der Körperkonstitution mit Korrelationskoeffizienten von $r=0.396$ (Gewicht), $r=0.439$ (Kaliber) und $r=0.228$ (Referenzvolumen). Dagegen ergab sich für DL5 mit Korrelationskoeffizienten von $r=0.076$, $r=0.135$ und $r=-0.022$ praktisch keine signifikante Korrelation.

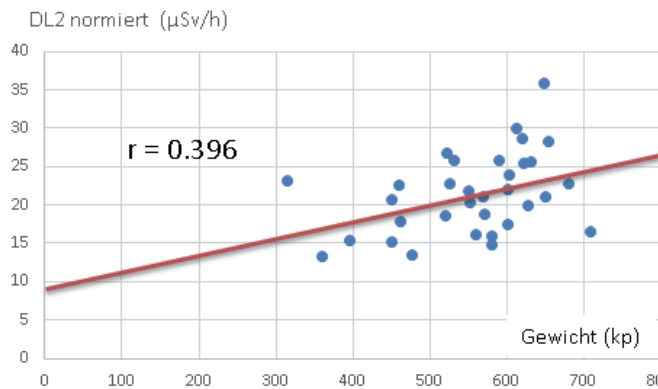


Abb. 22: Korrelation von DL2 (normiert) und Gewicht

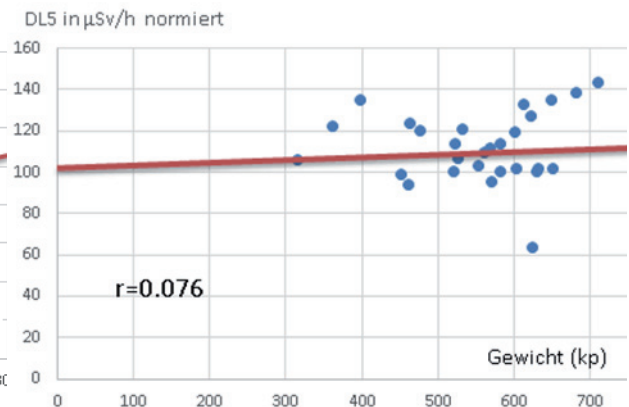


Abb. 23: Korrelation von DL5 (normiert) und Gewicht

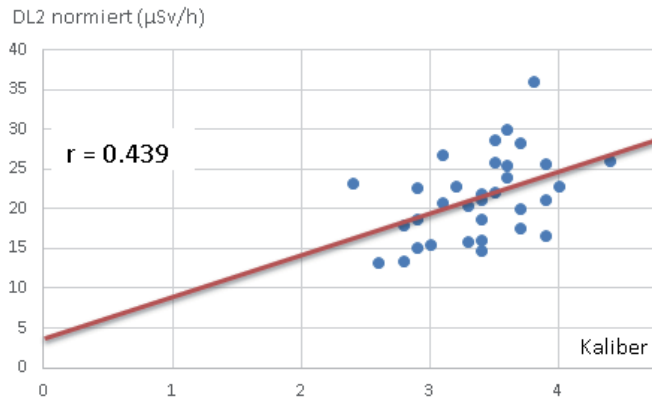


Abb.24: Korrelation von DL2 (normiert) und Kaliber

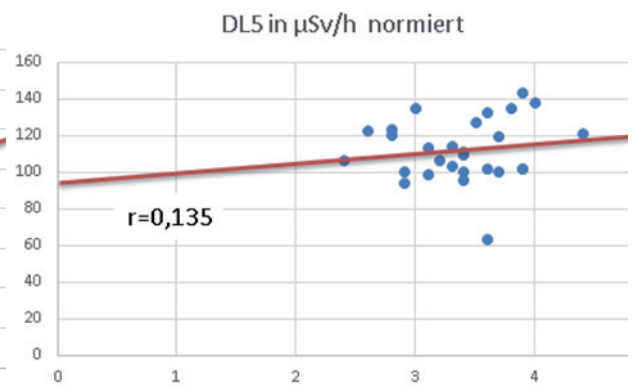


Abb. 25: Korrelation von DL5 (normiert) und Kaliber

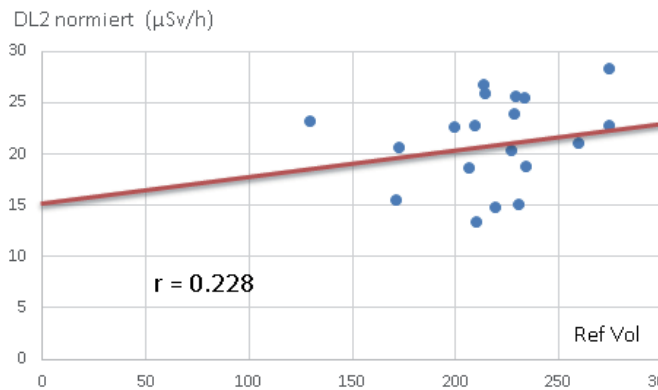


Abb. 26: Korrelation von DL2 und Referenzvolumen

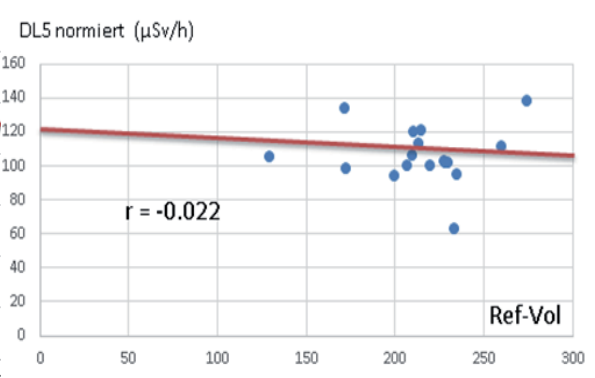


Abb. 27: Korrelation von DL5 und Referenzvolumen

3.3.10 Die Ergebnisse der eigenen Umfrage

25 Tierkliniken wurden angeschrieben und gebeten den eigens entwickelten Umfragebogen zum Thema „Strahlenexposition des beteiligten Personals bei der Skelettszintigrafie des Pferdes mit Technetium 99m- Diphosphonat“ auszufüllen. Davon haben 14 Kliniken auf die Anfrage geantwortet.

Die Originalfragen mit Ergebnissen sind im Anhang unter Punkt 9.5 eingefügt. Im Folgenden sind die relevantesten Ergebnisse wiedergegeben:

Wie viele Szintigrafien führen Sie (die Klinikbesatzung) im Durchschnitt pro Monat durch?

- 3 Kliniken 1 - 4 Szintigrafien / Monat
- 7 Kliniken 5 – 20
- 4 Kliniken > 20

Wie hoch wird Technetium dosiert?

- 1 Klinik < 10 MBq/kg KG
- 11 Kliniken 10 MBq/kg KG
- 1 Klinik > 10 MBq/kg KG
- 1 Klinik konnte diese Frage nicht beantworten

Tragen Sie Schutzkleidung (Handschuhe, Überziehschuhe, Overall) im Kontrollbereich?

- Lediglich ein Teilnehmer antwortete mit „nein“.

Werden von Mitarbeitern Bleischürzen während des Ablaufs einer Szintigrafie getragen?

- In 8 Kliniken werden Bleischürzen getragen, in 5 Kliniken nicht, in 1 Klinik ist das Tragen von Bleischürzen situationsabhängig.

Können Sie abschätzen, wie hoch die Strahlungsexposition pro Ganzkörperknochenszintigrafie für einen Mitarbeiter ist? Falls Sie mit JA antworten, bitte im Textfeld unten den geschätzten Wert eingeben.

- 10/14 Teilnehmer antworteten mit „nein, es würde sie aber interessieren.“
- In 4 Kliniken, die diese Frage mit „ja“ beantwortet haben, gaben als Antworten zur Strahlenexposition Werte von „2-3 $\mu\text{Sv}/\text{Szintigrafie}$ “, „100 $\mu\text{Sv}/\text{Szintigrafie}$ “ und „keine Strahlenbelastung, solange kein Urin aus dem Pferd austritt“.

Bitte schätzen Sie: Wie oft kann ein Helfer bei der strahlungsintensiven Röntgenaufnahme der HWS assistieren, um mit der gleichen Dosis (μSv) exponiert zu werden wie bei einer GKS?

- 6 Kliniken antworteten < 10 Röntgenaufnahmen
- 2 antworteten 10 Röntgenaufnahmen,
- 2 antworteten: > 10-50 Mal
- 2 Teilnehmer konnten keine Einschätzung abgeben.

Gibt es ein festes Szintigrafie-Team in Ihrer Klinik?

(Gleicher Tierarzt/ Pfleger /TFA)

- Lediglich 2 Kliniken antworteten mit „Ja“, die restlichen Teilnehmer geben an ein (minimal) wechselndes Team zu haben. Der durchführende Tierarzt ist jedoch fast bei allen immer derselbe.

Sind Personen, welche in der Szintigrafie tätig sind, zusätzlich im Röntgen beschäftigt?

- N=9 antworteten mit „ja“, n=5 mit „gelegentlich“.

Hatten Sie in der Vergangenheit verzeichnete Arbeitsunfälle im Rahmen der Szintigrafie?

- Lediglich ein Teilnehmer antwortete mit „ja“

Wie viele Sekunden Aufnahmezeit wählen Sie pro Bild?

- 6 Kliniken: 60 Sekunden
- 3 Kliniken: 90 Sekunden
- 5 Kliniken: 70-120 Sekunden

Wie lange dauert bei Ihnen in etwa eine GKS?

- 1 Klinik: 1 h
- 7 Kliniken: 1,5 h
- 1 Klinik: 2 h
- 5 Kliniken: 2,5

Wie lange dauert bei Ihnen eine Teilkörperknochenszintigrafie?

- 4 Kliniken: 0,5 h

- 7 Kliniken: 1h
- 3 Kliniken: 1,5 h

Welcher Kategorie gehören Mitarbeiter, welche in der Szintigrafie tätig sind, an?

- 2 Kliniken: Kat. A
- 10 Kliniken: Kat. B
- 2 Kliniken konnten keine Angabe machen unbekannt

Wie viel Personen sind in den Ablauf einer Szintigrafie involviert?

(Aufbereitung Radioaktivität/Injektion Radiopharmakon /Halter)

- 11 Kliniken: > 3 Personen
- 3 Kliniken: < 3 Personen

Wie lange wird der Kontrollbereich eingerichtet?

- 3 Kliniken: 24 h
- 4 Kliniken: 48 h
- 5 Kliniken: 72 h
- 3 Kliniken konnten keine Angabe machen

Wie oft gehen Mitarbeiter, welche in der Szintigrafie mitarbeiten, zur ärztlichen Vorsorgeuntersuchung?

- 1 Klinik: gar nicht
- 5 Kliniken: 1 x jährlich
- 1 Klinik: alle 2 Jahre
- 7 Kliniken konnten keine Angabe machen

4 Diskussion

4.1 Intention der Untersuchung

Die weit verbreitete Furcht vor Strahlung ist nicht nur im veterinärmedizinischen Bereich präsent, sondern zu großen Teilen in den Köpfen der Bevölkerung. Strahlung kann, wie bereits erwähnt, gesundheitlich relevante Schäden im Organismus hervorrufen. In Realität erleidet der Mensch so gut wie nie Strahlungsdosen in der Höhe, dass sie akuten Schaden am menschlichen Körper anrichten oder gar letal sind. Beruflich strahlenexponiertes Personal kommt äußerst selten an die Grenze der gesetzlichen Höchstdosis von 20 mSv/Jahr. Trotz intensiver Arbeit mit ionisierenden Strahlen erreicht ein Hauptteil des Personals nicht annähernd diese Grenze.

Veterinärmedizinisch beruflich strahlenexponiertes Personal ist in weiten Teilen nur sehr schlecht über Strahlung und deren möglichen Ursachen informiert. In einer eigens durchgeführten Umfrage im Rahmen dieser Dissertation konnte festgestellt werden, dass Kliniker keinen Bezug zu der Höhe der Strahlendosis haben, der sie ausgesetzt sind. Dem Nichtwissen und dem allgemeinen Denken geschuldet, Strahlung bedeute unabdingbar eine Gefahr für den Organismus, entsteht ein irrationales Verhalten gegenüber Expositionen im Niedrig-Dosisbereich. Die Wirkung von Strahlung in niedriger Dosis ist bis heute ein kontrovers diskutiertes Thema. Durch jahrzehntelange Diskussionen in Fachkreisen über die Schädlichkeit jeder Strahlung und dem Festhalten an der Linear-No-Threshold-Hypothese durch öffentliche Gremien wie der UNSCEAR, BEIR und ICRP, manifestiert sich weiterhin der Furchtgedanke vor Strahlung und deren möglichen Folgen auf den menschlichen Körper, wie z.B. die Induktion von Neoplasien. Strahlung ist allgegenwärtig. Ein Deutscher ist im Schnitt einer jährlichen Dosis von 2,4 mSv durch natürliche, umweltbedingte Strahlung ausgesetzt. Menschen in Küstenregionen sind einer weniger als halb so hohen Dosis ausgesetzt, Menschen, die in Regionen mit schwermetallhaltigen Gesteinen oder in größerer Höhe leben, sind deutlich höheren Dosen ausgesetzt. Dennoch kann man keine relevanten regionalen Unterschiede in der Zahl der Krebserkrankungen feststellen. Menschliche Körperzellen sind in der Lage strahleninduzierte Schäden von 20-50 mSv Tagesdosis durch zelluläre Reparaturmechanismen zu beheben. Erst bei höheren Strahlendosen über 300 mGy nehmen das Ausmaß des somatischen

Frühschadens und die Wahrscheinlichkeit einer Tumorinduktion oder der genetischen Missbildung mit der Dosis zu. Bei niederen Strahlendosen deutlich unter 50 mGy sind aufgrund der geringen Schadenshäufigkeit weder die Induktion von Frühschäden, noch die Wahrscheinlichkeit einer Tumorinduktion nachweisbar. Wichtig ist, die Situationen und den Umgang mit ionisierender Strahlung vernünftig einschätzen zu können und das eigene Bewusstsein zu schärfen. Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, die Strahlenexposition des beteiligten Personals bei der Skelettszintigrafie mit Tc99m-Diphosphonat beim Pferd zu ermitteln und somit eine reelle Einschätzung über das tatsächliche Strahlenrisiko in der täglichen Routine in veterinärmedizinischen Kliniken mit Szintigrafie wiederzugeben. Es sollte eine einleuchtende Darlegung des aktuellen Wissenstandes erfolgen und aus den Untersuchungsergebnissen eine Empfehlung für den Umgang mit szintigrafischen Untersuchungen des Pferdes resultieren.

4.2 Normierungen der Ergebnisse der Dosismessungen für den Vergleich

Die Datenerhebung erfolgte an 33 Patienten, sowie an zusätzlichen 10 Patienten für den Vergleich der Dosisleistung mit und ohne Bleischürze. Die applizierte Aktivität schwankte zwischen 4,1 Gigabecquerel (GBq) bis 8,6 GBq pro Pferd. Normiert auf das Körpergewicht (KG) variierte die verabreichte Aktivität somit von 10,4 MBq/kg KG bis 17,5 MBq/kg KG. Die applizierten Aktivitäten sind in Tab. 54 dargestellt. Die verabreichte Aktivität wurde je nach Kooperationsbereitschaft des Pferdes und der Körperkonstitution gewählt. Durch eine höhere verabreichte Aktivität konnten die Aufnahmezeit verkürzt und somit Bewegungsartefakte unruhiger Pferde minimiert werden. Aufgrund der damit verbundenen mangelnden Vergleichbarkeit der Dosismessungen wurden alle Dosiswerte bis auf die Werte an MP1 auf eine vergleichbare applizierte Dosis von 10 MBq/kg KG normiert.

Die Person P1, die mit MP1 überwacht wurde, befand sich im Heißlabor. Sie hatte keinen Kontakt zum Patienten nach der Injektion des Radiopharmakons, demnach blieb die Gesamtdosis an dieser Messposition von der Normierung unberührt. Die Normierung der Werte erfolgte durch Division der jeweiligen Dosiswerte mit der tatsächlich applizierten Aktivität, umgerechnet in MBq/kg KG und wurden multipliziert mit dem Faktor 10. Die zusammengefassten Dosen der Messungen, sowie Dosisleistungen sind in Tab. 9, Tab. 11, Tab. 12 und Tab. 14 im Kapitel Ergebnisse im

Text zu finden. Darin sind die originalen Messwerte und die normierten Werten aufgeführt.

4.3 Messgenauigkeit

Die Dosismessungen fanden im Rahmen der Szintigrafie im alltäglichen Routinebetrieb statt. Die Anbringung der Dosimeter erfolgte stets an selber Position, wie in Tab. 4 beschrieben. Da Aufnahmen der Szintigramme teilweise mit sehr viel Bewegung um das Pferd verbunden und die Abstände zum Patienten inkonstant waren, wurde hier auf eine personenbezogene Messung Wert gelegt. Je kleiner die Dosiswerte, desto größer war die relative Messunsicherheit. Das betraf vor allem die MP 4, an der nur geringe Strahlendosen aufgezeichnet worden waren. An Positionen mit wenig Bewegung von und zur Strahlungsquelle konnten konstantere Messwerte ermittelt werden, als an Messpositionen mit viel Bewegung und demzufolge veränderten Abständen zum Patienten. MP2 befand sich relativ konstant am Pferdkopf, die P2 bewegte sich nur eingeschränkt. Intensivere Patientenkontakte kamen hier nur bei Aufnahme der HWS vor. Wie im Ergebnissteil unter 3.3.5 bereits erwähnt, wurden die Dosismessungen an MP5 und MP6 mit dem natürlichen Zerfall von Technetium überprüft und konnten ein relativ korrektes Messergebnis bestätigen. Der radioaktive Zerfall ist durch die Natur vorgegeben und kann durch äußere Einflüsse nicht beeinträchtigt werden. Er folgt dem strengen Gesetz der Zeit. Technetium zerfällt mit einer Halbwertszeit von 6,01 Stunden. Daraus lässt sich der Zerfall in % pro Zeiteinheit errechnen (Tab. 13). Nach 12 h waren die Messwerte wie zu erwarten um ca. 75% erniedrigt.

Die Anbringung der Dosimeter an diesen MPs erfolgte für jeden Patienten gleich, ein Verrutschen der Dosimeter wurde nicht beobachtet. MP6 wies höhere Schwankungen pro Messreihe auf als MP5. Eine weitere Beeinflussung der Messergebnisse beider Messpositionen am Pferd wurde durch evtl. Urinieren nach Injektion des Radiopharmakons beobachtet. Das in Abb. 28 gewählte Beispiel über den Verlauf der Dosisaufzeichnungen an Patient Nr.4 zeigt Schwankungen der DL mit temporären Anstiegen. Während der im Diagramm ersichtlichen Anstiege der Dosisleistung stand das Pferd in der Box. Ein erstes Absetzen von Urin erfolgte kurz vor Anstieg der DL bei 78 Min. p.i. bzw. bei 308 Minuten p.i.. Die ermittelte Regressionsgerade ist in Form der gestrichelten Linie dargestellt und zeigt einen exponentiell abfallenden Verlauf der DL5

und DL6. Weitere geringe Abweichungen lassen sich durch leichte Ungenauigkeiten in der Ablesung der Uhrzeit und eine geringe Messungenauigkeit der Dosimeter erklären.

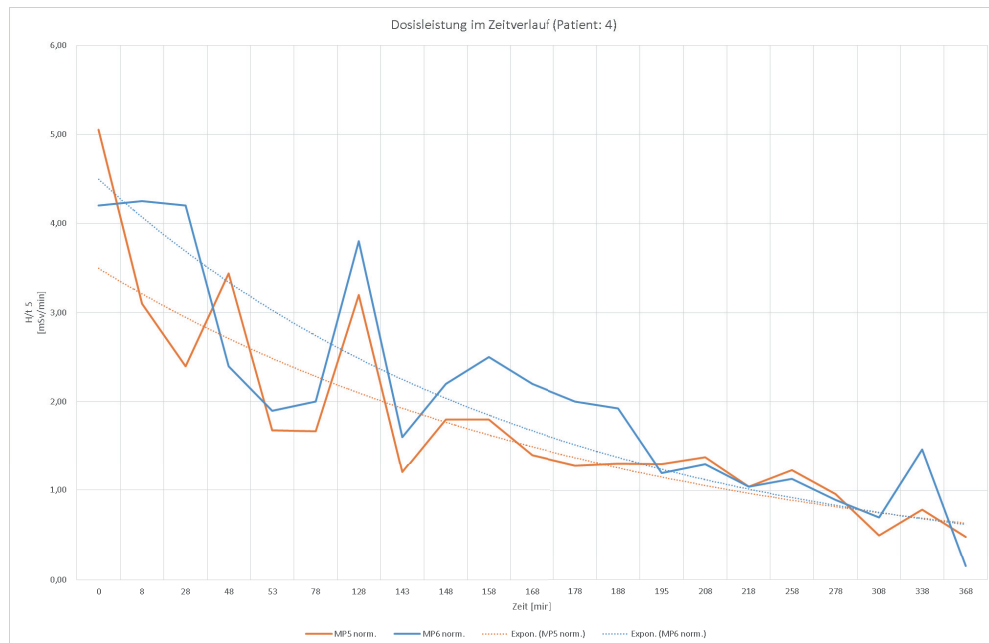


Abb. 28: Dosisleistung im Zeitverlauf (Patient: 4)

4.4 Interpretation Ergebnisse für MP1-4

Nach Herstellung des Eluates wurde das Natriumpertechetat unmittelbar danach zur weiteren Aufbereitung in die Räumlichkeiten der Szintigrafie überbracht. Die Aktivität des Eluats schwankte zwischen 9 GBq und 24 GBq. Dadurch wurde die P1 unterschiedlich hohen Expositionen bei Aufbereitung des Radiopharmakons ausgesetzt. Die durchschnittlich benötigte Zeit an dieser Messposition betrug lediglich 6 Minuten. Aufgrund der kurzen Aufenthaltsdauer lag die durchschnittliche Dosisleistung bei 123 µSv/h bzw. 2 µSv/Min (siehe Tab. 7: Messdaten der Patienten 1 - 33 an MP1). Diese DL war somit die höchste für beteiligtes Personal. Aufgrund der kurzen Expositionsdauer lagen die Dosiswerte dennoch durchschnittlich bei nur 12 µSv pro Aufbereitung. Eine Unterscheidung wie an den anderen Messpositionen in GKS und TKS, sowie eine Normierung der Werte auf 10MBq/kg KG war hier nicht notwendig, da ein Kontakt zum Patienten nach Injektion nicht mehr bestand. Dieser Arbeitsplatz muss aufgeräumt sein, alles nötige Equipment muss bereit stehen und sämtliche

Vorbereitungen für das Ansetzen des Kits und das Aufziehen der Spritzen müssen vor der Handhabung mit den hohen Aktivitäten getroffen sein, dann kann die Strahlenexposition minimiert werden.

Die höchste Dosis wurde im Mittel an MP2 gemessen. Dies überrascht zunächst, weil P2 „nur“ am Kopf des Pferdes steht, um den Patienten zu beruhigen, während P3 engen Kontakt zu den Gliedmaßen und den gesamten Pferdekörper hat, wenn die Extremitäten aufgehoben und gehalten werden müssen. Darüber hinaus scheint insbesondere bei der Untersuchung der hinteren Extremitäten die Nähe zum Urogenitaltrakt eine erhöhte Strahlenexposition mit sich zu bringen, da auf den Szintigrammen immer die Nieren und die aktivitätsgefüllte Blase intensiv zur Darstellung kommen. Diese Vermutung erweist sich aber nicht als richtig. Durch den Weichteilmantel wird die gesamte Strahlung stark abgeschwächt. 5 cm Weichteilgewebe absorbieren 140-keV-Gammastrahlung etwa um einen Faktor 2. Wird die Blase durch 10 bis 15 cm dickes Weichteilgewebe abgeschirmt, wird die Dosis um einen Faktor 4 bis 10 reduziert. Im „Bild“ sind Blase und Nieren nur deswegen intensiv aktivitätsbelegt sichtbar, weil das umgebende Weichteilgewebe 2 bis 3 Stunden p.i. nur noch wenig Aktivität enthält.

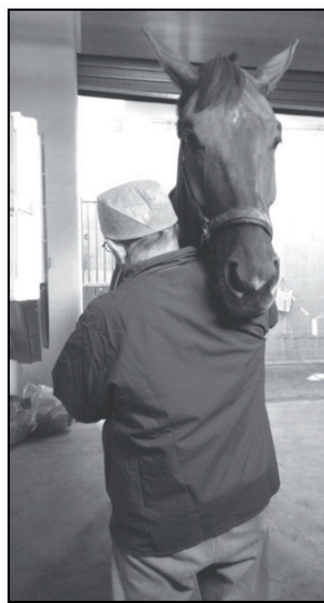


Abb. 29: MP2 bei Aufnahme der HWS

Die Vorstellung, dass von Nieren und Blase eine erhöhte Strahlenexposition ausgehen müsste, wird also durch den visuellen Eindruck der relativen Aktivitätsunterschiede nur vorgetäuscht.

Betrachtet man beim Pferd die Verteilung von Knochen- und der Weichteilgewebe, so ergibt sich, dass im Bereich des Abdomens nur wenig Knochengewebe liegt, das zudem von viel Weichteilgewebe abgeschirmt wird, und dass auch die aktivitätsbelegten Organe Niere und Blase durch viel absorbierendes Weichteilgewebe strahlungsmäßig abgeschirmt werden. Dagegen finden sich z.B. im Bereich des Kopfes viele intensiv speichernde Knochenstrukturen, die kaum durch Weichteilgewebe abgeschirmt werden, weshalb hier die Gammastrahlung den Patienten nahezu ohne Absorption verlassen und auf das Personal einwirken kann. Diese Untersuchung zeigt, dass nicht die Hilfsperson P3, welche sich nahe am Pferdekörper befindet, der höchsten Dosis ausgesetzt ist, sondern die Person P2, welche sich am Kopf des Pferdes befindet (Abb. 29).

Die Schwankungen der normierten Dosisleistung bei MP2 sind in Abb. 30 dargestellt. Die mittlere DL betrug $22 \mu\text{Sv/h}$, die Standardabweichung $5,04 \mu\text{Sv/h}$, der relative Fehler des Mittelwerts 0,23. Die Schwankungen lassen sich dadurch erklären, dass je nach Temperament, Sedierungsgrad und Kooperationsbereitschaft des Patienten teilweise eine stete Fixation in Halfternähe von Nöten war oder aber das Pferd am locker hängenden Strick gehalten werden konnte. Für Kopf- und kraniale Halswirbelsäulenaufnahmen wurde der Pferdekopf in einigen Fällen auch auf die Schultern genommen. Dies war dann notwendig, wenn das Pferd entweder zu tief sediert war (Kopf hing zu tief) oder aber zu wach war (Kopf bewegte sich zu viel). Durch das Auflegen der Mandibularäste auf die Schulter dieser Person wurde die Strahlenexposition verstärkt.

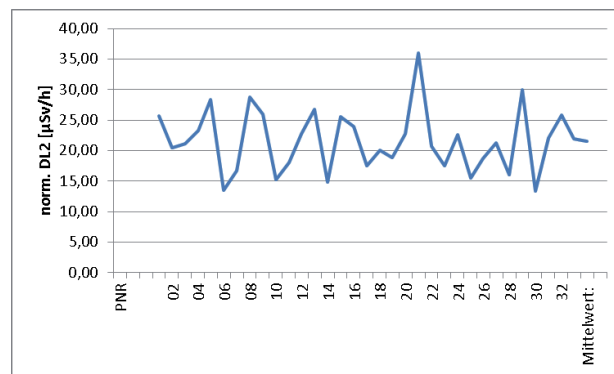


Abb. 30 Schwankungen der normierten DL2 im Zeitverlauf

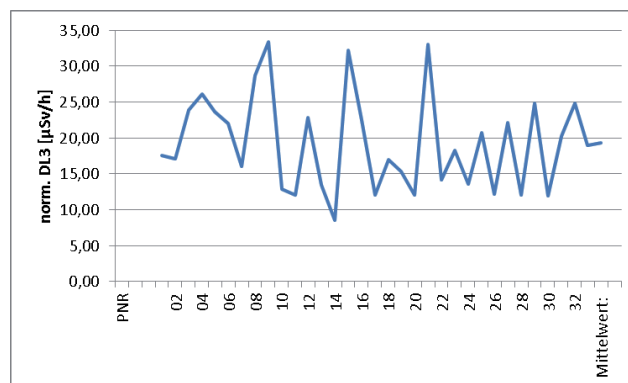


Abb. 31 Schwankungen der normierten DL3

Die Schwankungen der normierten Dosisleistung bei MP3 zeigt Abb. 31. Die mittlere DL war mit 19 $\mu\text{Sv/h}$ etwas niedriger als bei MP2, die Standardabweichung betrug 6,51 $\mu\text{Sv/h}$, somit war der relative Fehler des Mittelwerts mit 0,34 etwas höher als bei MP2.

An MP3 war deutlich mehr Bewegungsspielraum als an allen anderen MPs. Die P3 konnte sich von dem Patienten wegbewegen, wie es zur Untersuchung passte. Die höchste gemittelte Dosisleistung pro Patient betrug 33 $\mu\text{Sv/h}$, die niedrigste 8 $\mu\text{Sv/h}$. Diese hohen Schwankungen lassen sich durch die individuellen Besonderheiten jeder Szintigrafie erklären. Bei kooperativen und gut sedierten Patienten wurde naher, dosisintensiver Kontakt zum Patienten vermieden. Dennoch kam es häufiger vor, dass Aufnahmen der Hintergliedmaßen aufgrund von zu großen Bewegungsartefakten oder

weil sich der Patient wegbewegte wiederholt werden mussten. Vor allem für diese Aufnahmen ist P3 dabei sehr nahe an dem Pferdekörper, wie Abb.32 zeigt.



Abb.32: Positionierung für 180° Aufnahme der Hintergliedmaßen

Zudem befindet sich der Oberkörper nahe an den Knochen der Hinterbeine, welche durch wenig Weichteilgewebe eine nur geringere Absorptionsschicht aufweisen. Das erklärt, dass die Schwankungsbreite höher war als an MP2, was die Grafiken in Abb. 30 und Abb. 31 zeigen und die unterschiedlich hohen relativen Standardabweichungen belegen.

Auf Grundlage der auf 10 MBq/kg KG normierten Dosismessungen wurden „maximale Aufnahmezahlen“ errechnet, die nach den Richtlinien der StrSchV zulässig sind. Bei einer durchschnittlichen Exposition von 31 $\mu\text{Sv}/\text{Szintigrafie}$ für den Halter am Pferdekopf sind im Mittel 190 GKS möglich, bis die berufliche Höchstgrenze für Personal der Kat. B ($< 6\text{mSv/a}$) erreicht wird, für Personal der Kat. A ergeben sich ca. 650 GKS/Jahr.

		Kat. A	Kat. B
MP2	GKS	650	190
	TKS	870	260
MP3	GKS	710	210
	TKS	1050	320
MP4	GKS	4000	1200
	TKS	6600	2000

Tab. 17: Gerundete „zulässige“ Aufnahmezahlen/Jahr für MP2-MP4 in Kat. A u. Kat. B bei Applikation von „Normaktivitäten“ von 10 MBq/kg KG

Für die Person an MP3 ergeben sich aus den Dosismittelwerten von 28 $\mu\text{Sv}/\text{GKS}$ entsprechend etwa 210 GKS/Jahr bei Einstufung in Kat. B und ca. 710 GKS/Jahr bei Einstufung in Kat. A. Bei TKS, die weniger lang dauern, sind die Untersuchungszahlen höher. Diese Zahlen sind in Tab. 17 wiedergegeben.

An MP4 zeigen die Messdaten nur mäßig hohe Schwankungen. In dieser Messposition war das Personal mit Abstand die am wenigsten exponiert, was sich aus dem erhöhten Abstand zur Strahlungsquelle erklären lässt. Die Entfernung zum Patienten betrug im Schnitt 1,5 Meter. Das Abstandquadratgesetz besagt, dass die Dosisleistung pro Fläche mit zunehmendem Abstand von der Strahlenquelle umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands abnimmt. Anhand der gesteigerten Distanz zur Strahlungsquelle Pferd ist an dieser MP die Exposition deutlich reduziert. Im Vergleich zur DL2 beträgt die DL4 nur noch 16%. Unter Berücksichtigung der Messungenauigkeiten wurde mit den Dosismittelwerten der einzelnen Messpositionen gerechnet. Für die P4 in Kat. B ergibt sich eine Zahl von ca. 1200 GKS/a, für Personen der Kat. A ca. 4000 GKS/a (Siehe Tab. 18).

Da die Untersuchungszeiten je nach Klinik und Aufgabenstellung (GKS versus TKS) sehr unterschiedlich sind, werden in Tab. 18 maximal zulässige Untersuchungszahlen für Personal der Kategorie A und B für Untersuchungsdauern von 1 und 2 Stunden wiedergegeben

		Kat A	Kat B
MP2	1h / Szinti	942	283
	2h / Szinti	471	141
MP3	1h / Szinti	1091	327
	2h / Szinti	546	164
MP4	1h / Szinti	6490	1950
	2h / Szinti	3245	975

Tab. 18: „Zulässige“ Aufnahmezahlen/Jahr für MP2-MP4 in Kat. A u. Kat. B für mittlere Untersuchungsdauern von 1 und 2 h

Die grafischen Auswertungen (Abb. 12, Abb. 13, Abb. 14) zeigen für MP2, MP3 und MP4 die lineare Regressionsgerade für die entsprechenden Messwerte. Physikalisch korrekt müsste die Regression durch eine etwa logarithmische Kurve approximiert werden, die bei einer Expositionszeit von $t=0$ den Nullpunkt schneiden muss und bei Expositionszeiten, die sehr spät nach der Injektion liegen, wegen des exponentiellen Zerfalls immer schwächer ansteigt. Für den Untersuchungszeitraum von 1 bis 2 h p.i., der „kurz“ ist im Vergleich zur Halbwertszeit von Tc99m von 6 Stunden können die Regressionsgeraden aber gut für eine Abschätzung der Strahlenexpositionen herangezogen werden.

4.5 Höhe der applizierten Aktivität

Bei einer spezifischen Aktivität von 10 MBq/kg KG ist die Bildqualität bei Aufnahmezeiten von ca. 60 s sehr gut. Die gesamte Aufnahmezeit einer GKS betrug im Mittel 34 Minuten bei einer gesamten Untersuchungszeit von 92 Minuten. Für eine TKS war die Aufnahmezeit 20 Minuten, die Untersuchungszeit 62 Minuten (Tab. 6, Tab. 8). Somit betrug die reine Aufnahmezeit 37 % bzw. 32 % der Gesamtzeit.

Zur Vereinfachung der Rechnung wird angenommen, dass durch das Positionieren 60% und durch die Dauer der Bildaufnahme 40 % der Dosis aufgenommen werden, und dies ergibt bei einer normierten Dosierung von 10 MBq/kg KG eine Dosis von 100%.

Wird die Aktivität verdoppelt, werden weiterhin 40% der Dosis bei der reinen Aufnahme erhalten (doppelte Dosisleistung bei halber Aufnahmezeit), während bei der Positionierung die Dosis auf 120 % ansteigt, womit sich eine gesamte Dosis von 160 %

ergibt. Halbiert man die gegebene Aktivität, reduziert sich der Wert bei Positionierung auf 30 %, der Wert für die Bildaufnahme bleibt wiederum gleich bei 40 %, sodass insgesamt die Dosis um 30 % reduziert wird.

Eine deutliche Reduktion der spezifischen Aktivität unter 10 MBq/kg KG ist aber nicht zu empfehlen, da dann bei längeren Aufnahmezeiten / Szintigramm die Gefahr von Bewegungsunschärfen steigt und damit die diagnostische Bildqualität leidet.

4.6 Interpretation der Ergebnisse für MP5, MP6 und MP7

Die Dosisleistung der MP5 war in den Ablesungen 2, 4, 6 und 12 h nach Injektion stets höher als an MP6. Dieser Unterschied kann durch die anatomischen und funktionellen Unterschiede der Messpositionen erklärt werden. Durch die Positionierung kaudal der Skapula liegt das Dosimeter an MP5 einem großen Knochen an, der an dieser Stelle durch den M. trapezius und den M. latissimus dorsi überdeckt ist. Zudem befinden sich die Wirbelkörper und die Rippenbögen direkt unterhalb des Dosimeters an MP5.

Das Dosimeter an MP6 liegt kranial der Flanke auf Höhe der retroperitoneal gelegenen Niere. Die Nieren und die weiter entfernt gelegene Blase kommen zwar bildlich im Szintigramm gut aktivitätsbelegt zur Darstellung, ihre Strahlung wird aber durch Weichteilgewebe stark abgeschirmt. Knochenstrukturen, die 2 bis 3 h p.i. wesentlich stärker als Weichteilgewebe speichern, sind zu MP6 weiter entfernt als bei MP5. Dadurch wird die geringere Dosisleistung bei MP6 im Vergleich zu MP5 gut erklärt. Die Schwankungen der Dosisleistung in MP6 werden durch die unterschiedliche Füllung der Blase erklärt, jedes Mal nach Urinieren wurde ein Abfall der Dosisleistung beobachtet.

Die Anbringung der Dosimeter erfolgte stets gleich und direkt auf der Körperoberfläche der Pferde. Die Werte am Pferd sind demnach sehr sensitiv und können gut zur Beurteilung und Einschätzung der Strahlungsintensität herangezogen werden. DL5 wurde mit DL2 verglichen. Diese beiden Messpositionen wiesen zum einen die geringsten Schwankungen auf, zum anderen stellen sie beide den kranialen Teil der Messpositionen dar. Wie zu erwarten konnte hier eine Korrelation zwischen dem Anstieg der einen DL zur anderen festgestellt werden.

4.7 Vergleich mit Daten aus der Literatur

In der Literatur sind nur wenige Publikationen zur Strahlenexposition des Personals bei der Skelettszintigrafie beim Pferd zu finden.

Whitelock maß Dosisleistungen (DL) nach Applikation von 3,5 – 4,2 GBq pro Pferd (Whitelock 1997). Ausgewertet wurden vermutlich 3 Pferde- die genaue Patientenzahl ist in der Publikation nicht erwähnt, ebenso ist die spezifische Aktivität (MBq/kg KG) nicht angegeben. Unmittelbar auf der Hautoberfläche fiel die Dosisleistung nach spätestens 16 h auf $< 7,5 \mu\text{Sv/h}$, in einem Meter Abstand war dieser Wert nach längstens 6 h erreicht. Daraus leitet der Autor ab, dass ein Pferd nach spätestens 16 h den Kontrollbereich verlassen kann. Aussagen zur Strahlenexposition des Personals werden in dieser Publikation nicht gemacht.

Steyn und Uhrig werteten die Strahlenexposition bei 19 Skelettszintigrafien von Pferden aus, bei denen die Patienten 5,7 – 7,3 GBq erhalten hatten. Die spezifische Aktivität ist nicht angegeben, sie lag vermutlich über 10 MBq/kg KG. Die Pferde wurden 2-4 Stunden p.i. szintigrafiert. Nahe am Pferd wurden DLs von 40-60 $\mu\text{Sv/h}$ gemessen, im Abstand von 0,3 m zum Patienten 19 $\mu\text{Sv/h}$. Eine Röntgenschürze ergab einen Dosisreduktionsfaktor (DRF) von 3.6 bis 5.7 (Steyn und Uhrig 2005).

Gatherer et. al publizierten Daten von 9 Skelettszintigrafien. Injiziert wurden 10 MBq/kg KG, die Szintigrafie begann 3 h p.i. Während der Szintigrafien, die ca. 2 h dauerten, wurden kumulative Strahlendosen alle 15 Minuten abgelesen. Die Autoren geben eine mittlere DL von 0,12 $\mu\text{Sv/Minute}$ an, entsprechend einer DL von 7,2 $\mu\text{Sv/h}$ (Gatherer et. al 2007). In der abgebildeten Grafik kann man allerdings 60 Minuten nach Beginn der Messung eine DL von 12 $\mu\text{Sv/h}$ ablesen, ein Widerspruch, der unverständlich ist.

Baixeras et. al publizierten eine Untersuchung von nur einer Szintigrafie. Das Pferd erhielt eine spezifische Dosis von 8 MBq/kg KG. Die Szintigrafie wurde 3 h p.i. begonnen und dauerte 1,5 Stunden. Die Ortsdosisleistung betrug in 0,5 m Abstand 44 $\mu\text{Sv/h}$, in 2 m Abstand 10 $\mu\text{Sv/h}$. Die Person, die am Kopf des Pferdes stand, erhielt eine Dosis 8 $\mu\text{Sv/Szintigrafie}$, gemessen unter einer Bleischürze (Baixeras et. al 2004). Unter Annahme eines DRF von 3 entspricht dies einer DL von 16 $\mu\text{Sv/h}$, normiert auf eine spezifische Aktivität von 10 MBq/kg KG ergibt sich eine DL von 20 $\mu\text{Sv/h}$.

In der vorliegenden Studie wurde bei einer normierten Aktivität von 10 MBq/kg KG für P2 (Halter am Kopf) eine DL von 22 $\mu\text{Sv/h}$ gemessen, für P3 (zusätzliche Hilfskraft) 19 $\mu\text{Sv/h}$. Diese Daten sind vergleichbar mit der Exposition, die Steyn und Uhrig bei der Auswertung von 19 Szintigrafien in 30 cm Abstand gemessen haben und passen ebenfalls gut zu dem singulären Wert von Baixeras et. al von 20 $\mu\text{Sv/h}$.

Im Unterschied zu den bisher publizierten Daten sind die in der vorliegenden Studie gemessenen Expositionen besser standardisiert. Alle Szintigrafien wurden 2 h p.i. begonnen. Die Untersuchungszeit war mit 60 Minuten pro TKS bzw. 90 Minuten pro GKS kürzer, weshalb die gemittelten DLs weniger durch die kurze HWZ (Zerfall Tc99m) beeinflusst werden. Außerdem sind die erhobenen Daten praxisnäher, weil jeweils die tatsächliche Exposition von P2 und P3 ermittelt wurde und nicht Ortsdosisleistungen in willkürlich festgelegten Abständen vom Patienten.

Für die Entlassung der Patienten aus dem Kontrollbereich ist die Strahlenexposition an der Hautoberfläche der Pferde wichtig. Sie wurde durch die Dosimeter an MP5 und MP6 ermittelt. Im Zeitintervall zwischen 2- 4 h p.i. betrug sie 87 bzw. 81 $\mu\text{Sv/h}$. Steyn und Uhrig geben eine DL von 50 – 60 $\mu\text{v/h}$ an, wobei der Beginn der Untersuchung zwischen 2 und 4 h p.i. variierte. Somit sind die Werte dieser Studie gut vergleichbar, aber wiederum besser standardisiert. Whitelock gibt an, dass 16 h p.i. die DL an der Hautoberfläche des Pferdes unter 7,5 $\mu\text{Sv/h}$ liegt. Unter der Annahme, dass Warmblüter mit einem Körpergewicht von 550 kg untersucht wurden, aber nur 4 GBq appliziert wurden, ergäbe sich bei einer spezifisch verabreichten Aktivität von 10 MBq/kg KG eine Dosisleistung von ca. 10 $\mu\text{Sv/h}$. In vorliegender Studie wurde im Zeitraum von 6-12 h p.i. eine durchschnittliche DL von 49 bzw. 45 $\mu\text{Sv/h}$ gemessen. Daraus ergibt sich bei einer effektiven HWZ von 5 h eine DL von 24 $\mu\text{Sv/h}$ nach 14 h p.i., nach 16 h etwa 11 $\mu\text{Sv/h}$. Dieser Wert passt somit gut zu den Angaben von Whitelock, wobei wiederum die Daten dieser Studie präziser erhoben und statistisch aussagekräftiger sind.

4.8 Berechnung der effektiven Halbwertszeiten von Tc99m-Diphosphonat

Bei 15 Patienten wurden zu den Zeitpunkten 2, 4, 6 und 12 h p.i. die kumulierten Dosen bei MP5 komplett dokumentiert. Die gemittelten normierten Dosen sind 227 (2 h), 345 (4 h), 434 (6 h) und 579 (12 h) μSv . Daraus ergeben sich „zusätzliche“ Dosen (Dosiszuwachs, DZ) pro 1 Stunde Expositionszeit von 59, 44,5 und 24,2 $\mu\text{Sv/h}$ zum Zeitpunkt 3, 5 und 9 h p.i.

Die Aktivität $A(t)$ zum Zeitpunkt t ergibt sich nach dem exponentiellen Zerfallsgesetz als

$$A(t) = A_0 \exp(-t / t_{1/2} * \ln(2))$$

Formel 4: Zerfallsgesetz

daraus kann die Halbwertszeit $t_{1/2}$ berechnet werden als

$$\ln(A_1 / A_2) = (t_2 - t_1) / t_{1/2} * \ln(2),$$

$$t_{1/2} = (t_2 - t_1) * \ln(2) / \ln(A_1/A_2)$$

Für kurze Zeitintervalle kann näherungsweise aus der in diesem Zeitraum (zwischen t_1 und t_2) gemessenen Dosiszuwachs $DZ_{12} = D_2 - D_1$ auf die Aktivität A_{12} geschlossen werden, somit ergibt sich

$$t_{1/2} = (t_2 - t_1) * \ln(2) / \ln(DZ_1/DZ_2)$$

Zeit t (h)	2,05		4,02		6,02		11,59
normierte Dosis D (μSv)	227		345		434		579
Dosiszuwachs DZ ($\mu\text{Sv/h}$)		60,0		44,4		26,0	
"mittlere Zeit" (h)		3,03		5,02		8,81	
Halbwertszeit $t_{1/2}$ (h)			4,57		4,92		
"Messzeit" (h)			4,03		6,91		

Tab.19: Berechnung der Halbwertszeit $t_{1/2}$ in MP5 zum fiktiven Messzeitpunkt

Werden vereinfacht, wie in Tab.19 wiedergegeben, statt der exakten Aktivitäten A_1 und A_2 die „zusätzlichen“ Dosisbeiträge zu den mittleren Messzeiten bei 3, 5 und 9 h p.i.

(Formel 4), ergeben sich bei MP5 Halbwertszeiten von 4.6 und 4.9 h zur Zeit 4 und 6,9 h p.i. Diese Halbwertszeiten sind "effektive" Halbwertszeiten, die kleiner als die „physikalische“ Halbwertszeit von Tc99m mit 6 Stunden sein müssen, weil die Aktivität teilweise über den Harntrakt ausgeschieden wird.

Mit der effektiven Halbwertszeit von < 5 h kann der Verlauf der Dosisleistung über die Zeit berechnet werden. 12 h p.i. wurde als mittlere normierte Dosisleistung ein Wert von 50 $\mu\text{Sv/h}$ gemessen. 30 Stunden p.i., also nach weiteren 18 Stunden, ergibt sich eine Dosisleistung von 4,1 $\mu\text{Sv/h}$:

$$50 (\mu\text{Sv/h}) * \exp(-18/5 * \ln(2)) = 4,1 (\mu\text{Sv/h})$$

Bei $n=4$ Patienten wurde an MP5 eine Langzeitaufzeichnung über bis zu 48 h durchgeführt. Aus diesen Daten ergab sich 30 bis 40 h p.i. Dosisleistungen zwischen 2 und 4 $\mu\text{Sv/h}$, was im Rahmen der Messgenauigkeit sehr gut zu den oben berechneten Halbwertszeiten passt.

4.9 Dosis des Pflegepersonals, Freigabe der Einstreu, Entlassung des Patienten und Aufhebung des temporären Kontrollbereichs

4.9.1 Dosis Pfleger

Die an der Boxentüre gemessene Dosisleistung betrug im Mittel 7 bis 9 $\mu\text{Sv/h}$ über einen Zeitraum von 2 bis 12 h p.i. (Tab. 14). Der niedrigste Wert wurde im Zeitraum 2 bis 4 h p.i. gemessen, in dem das Pferd zum überwiegenden Teil szintigrafisch untersucht wurde und nicht in der Box stand. Die trotzdem gemessene Dosis bzw. DL resultiert aus der Aktivität in der Einstreu (nach Urinieren). Es wurden bei $n= 11$ Patienten weitere Messungen an MP7 über einen Zeitraum von 24 h und länger aufgezeichnet. Diese ergaben, dass ca. 26 Stunden p.i. bei einer durchschnittlich gegebenen Aktivität von 10 MBq/kg KG die gemessene Dosisleistung unter 3 $\mu\text{Sv/h}$ lag. Ein vergleichbarer Wert ergibt sich aus dem Zerfallsgesetz, nachdem 24 h p.i. die DL um einen Faktor 4 abgefallen sein muss ($9 \mu\text{Sv/h}/4 = 2.3 \mu\text{Sv/h}$). Ein Pfleger, der täglich 10 bis 20 Minuten das Pferd betreut (Füttern, gemistet wurde nicht), ist dadurch einer sehr geringen Strahlenexposition von weniger als 5 μSv ausgesetzt.

4.9.2 Freigabe der Einstreu

Wird die Pferdebox mit einer minimalen Einstreu aus zwei Späneballen (je 20 kg Masse) eingestreut, ergibt sich nach dieser Zeit eine spezifische Aktivität $10 \text{ MBq} / 40 \text{ kg} = 0,25 \text{ MBq/kg}$, nach weiteren 2 Halbwertszeiten liegt dann die spezifische Aktivität unter dem vorgeschriebenen Grenzwert von $0,1 \text{ MBq/kg}$, somit kann die Einstreu nach 3 Tagen (72 Stunden) problemlos mit dem normalen Mist entsorgt werden.

Die Messergebnisse ergaben sogar bereits nach 24 h einen Wert unterhalb $3 \mu\text{Sv/h}$. Für eine sichere und gefahrenlose Entsorgung empfiehlt es sich, den rechnerischen Zeitraum einzuhalten.

4.9.3 Temporärer Kontrollbereich

Ein Kontrollbereich ist nach § 36 StrSchV ein Bereich, in dem eine Person eine Dosis $> 6 \text{ mSv/Jahr}$ erhalten könnte. Bei 250 Arbeitstagen/Jahr ist dies dann der Fall, wenn die arbeitstägliche Dosis $6000/250 = 24 \mu\text{Sv}$ beträgt.

Die ungünstigste Annahme einer Dosisberechnung (wie bei Strahlenschutzüberlegungen gefordert wird) ist die, dass die gesamte Aktivität als Punktquelle ohne Absorption (durch den Patienten) auf einen Menschen einwirkt. Zur Berechnung der Dosis wird eine Arbeitszeit von 2000 h/Jahr bzw. 40 h/Woche oder (ungünstig) 8 h/Arbeitstag zugrunde gelegt.

Eine maximale Dosisleistung kann mit der Dosisleistungskonstanten Γ berechnet werden. Diese Konstante ist in Wikipedia mit $0,022$, in dem Tabellenbuch von Kohlrausch mit $0,015 \text{ (mGy m}^2 \text{ h}^{-1} \text{ GBq}^{-1}\text{)}$ angegeben (Kohlrausch 1996). Mit einem Wert von $0,02$ ergibt sich für eine Anfangsaktivität von 6 GBq eine DL_a von $0,12 \text{ (mGy/h)}$ im Abstand von 1 m . Daraus errechnet sich für die ersten 8 Stunden eine Dosis $D(0-8) = 620 \mu\text{Sv}$ (bei Gammastrahlung ist die Energiedosis in „Gy“ zahlenmäßig gleich der effektiven Dosis in „Sv“).

$$D(0-8) = DL_a * 6/\ln(2) * (1 - \exp(-8/6 * \ln(2))) = 0,12 * 6/\ln(2) * (1-0,4) = 0,62 \text{ mGy}$$

Für die nächsten 8 Stunden am Folgetag ergibt sich eine Dosis $D(24-32) = 39 \mu\text{Sv}$.

$$\begin{aligned} D(24-32) &= DL_a * 6/\ln(2) * (\exp(-24/6*\ln(2)) - \exp(-32/6*\ln(2))) = \\ &= 0,12 * 8,66 * (0,063 - 0,025) = 0,039 \text{ mGy} \end{aligned}$$

Diese „arbeitstägliche“ Dosis wird zu Beginn des 2. Arbeitstages gemessen und ist nach weiteren 6 Stunden auf die Hälfte abgefallen, also auf einen Wert unter $24 \mu\text{Sv}$. Somit kann der temporäre Kontrollbereich in Übereinstimmung mit der StrSchV problemlos nach 38 Stunden bzw. 2 Tage nach Injektion aufgehoben werden.

4.9.4 Entlassung der Patienten

Nach der StrSchV Anlage III beträgt die Freigrenze für Tc99m 10 MBq bei einer spezifischen Aktivität von 100 Bq/g, entsprechend $0,1 \text{ MBq / kg}$. Bei einem großen Pferd mit einer Masse von 600 kg werden normiert 6 GBq appliziert. Diese Aktivität ist nach 55 Stunden erreicht.

$$\begin{aligned} 10 &= 6000 * \exp(-t/6 * \ln(2)), \\ t &= 55 \text{ (h)} \end{aligned}$$

Bei einer HWZ von $t_{1/2} = 5 \text{ h}$ (entsprechend annähernd der effektiven HWZ) wäre dieser Wert bereits nach 44 h erreicht.

Die Dosismessungen an MP5 ergaben, dass die kumulierte, normierte Dosis nach 6 Stunden $436 \mu\text{Sv}$ und nach 12 Stunden $575 \mu\text{Sv}$ betrug (Tab. 11). Ab 12 Stunden p.i. fällt die Restaktivität im Pferdekörper mit einer effektiven Halbwertszeit von $< 5 \text{ h}$ ab. Im Sinne des Strahlenschutzes wird für die weiteren Überlegungen aber mit der maximal möglichen physikalischen HWZ von 6 Stunden gerechnet.

Im Zeitraum von $t=6$ bis $t=12 \text{ h p.i.}$ wurde eine (zusätzliche) Dosis von $575-436 = 139 \mu\text{Sv}$ gemessen. Ab diesem Zeitraum fällt die Dosis mit einer HWZ von 6 h ab, somit beträgt die Dosis im Zeitraum von $t=18$ bis $t=24 \text{ h p.i.}$ nur noch $35 \mu\text{Sv}$. Für den gesamten restlichen Zeitraum ergibt sich somit 24 h p.i. maximal eine kumulierte Dosis von $35 * 6 / \ln(2) = 145 \mu\text{Sv}$.

Nach StrSchV darf eine „unbeteiligte“ Person, die nicht dosimetrisch überwacht ist, im Kalenderjahr eine zusätzliche Dosis (aus nicht natürlichen Quellen) von max. 1 mSv erhalten.

Wird der Besitzer bzw. Halter des Patienten nicht aus anderen Quellen zusätzlich bestrahlt, kann nach dieser Abschätzung das Pferd dem Besitzer 24 h p.i. problemlos zurückgegeben werden. Der Besitzer kann das Pferd 24 h p.i. jederzeit wieder reiten.

Allerdings muss die Freigrenze eingehalten werden. Daher erfolgt eine Herausgabe frühestens nach unterschreiten der 10 MBq.

4.10 Dosis in Abhängigkeit von Kaliber, Gewicht und Referenzvolumen

Bei der Dosisabschätzung für Szintigrafien hört man oft die Phrase:“ Verabreiche diesem Pferd etwas mehr, da es besonders adipös ist“. Doch inwiefern hat die Körperkonstitution eine Auswirkung auf die Strahlenexposition nach außen? Um diese Frage zu beantworten, wurden Dosiswerte mit den verschiedenen Parametern der Körperkonstitution wie Gewicht, Kaliber und Referenzvolumen der Pferde verglichen. Die Patienten wurden dafür vor der Untersuchung auf einer digitalen Körperwaage gewogen und an den in Abb. 11 in Kapitel 3.2.3 eingezeichneten Messpunkten ausgemessen. Zusätzlich wurden die Widerristhöhe und die Gesamtlänge - gemessen von Schultergelenk bis zum Tuber ischiadicum - notiert. Es wurde das Kaliber der Pferde berechnet, um einen weiteren Parameter für den Vergleich der DL mit der Körperkonstitution zu haben. Des Weiteren erfolgte anhand der Formel 3 die Berechnung der Referenzvolumina der Pferde. Durch das Referenzvolumen wurde zwar nur der Rumpf erfasst, dennoch kann über die Höhe dieser Werte eine Aussage über die Körperfülle der Pferde getroffen werden. Für eine exakte Bestimmung des gesamten Körpervolumens müsste man den Rumpf inklusive Hals, Kopf und Beine berechnen. Dies würde aber eine „Pseudogenauigkeit“ bedeuten, die in relevanten Fragen des Strahlenschutzes nicht sinnvoll und nötig ist.

In den bis Abb. 22 bis Abb. 27 sind die normierten Dosisleistungen DL2 und DL5 mit den Parametern Gewicht, Kaliber und Referenzvolumen korreliert. Zwischen diesen Parametern und DL5 findet sich keine Korrelation (die Korrelationskoeffizienten betragen $r = 0,076$, $r = 0,135$ und $r = -0,022$).

Lediglich für DL2 ergibt sich eine schwache Korrelation. Von schwacher Korrelation wird bei r-Werten von 0,2 – 0,4 gesprochen (Brosius 1999). Die Korrelation für DI2 und das Kaliber ist am höchsten mit einem Wert von $r = 0,439$, während die anderen Korrelationskoeffizienten 0,396 (Gewicht) und 0,228 (Ref-V) betragen.

Unter der Annahme einer gewichtsnormierten Applikation von 10 MBq Tc99m pro kg KG ergibt sich in Messposition MP5 keine relevante Korrelation zur applizierten Aktivität. Das bedeutet, dass für Aufnahmen im Körperbereich eine gewichtsbezogene Aktivitätsapplikation wie gewünscht etwa dieselbe Bildgüte liefert, da die gemessene Dosis mit der Impulszahl, die die Gammakamera aufnimmt, linear korreliert ist. Somit ist eine gewichtsadaptierte Aktivitätsbemessung sinnvoll und erforderlich, um bei gleicher Aufnahmezeit unabhängig von der Konstitution des Patienten gleich gute Szintigramme aufzunehmen.

Im Bereich des Kopfes ist dagegen die Dosis DL2 schwach mit den Parametern, die die Konstitution des Pferdes beschreiben, korreliert. Dieser Unterschied wird dadurch erklärt, dass hier die austretende Strahlung und damit die gemessene Dosis kaum von Weichteilgewebe absorbiert wird. Somit nimmt die Dosis gering mit dem Gewicht (bzw. dem Kaliber) des Pferdes zu. Das bedeutet, dass Szintigramme, die vom Kopf oder den Extremitäten aufgenommen werden, bei schweren (adipösen) Pferden eine etwas bessere Zählstatistik aufweisen als bei leichteren Pferden.

Somit zeigte sich, dass die Vermutung in Gatherer's Studie, dass Größe und Körperkonstitution der Pferde eine Auswirkung auf die Absorptionskraft und damit verbunden eine verringerte Strahlenexposition nach außen mit sich bringt, nur bedingt bestätigt werden konnte. Faktoren wie das Gewicht, Kaliber und Referenzvolumen der Pferde hatten lediglich an der Position am Kopf einen Einfluss auf die Strahlenexposition des beteiligten Personals.

4.11 Interpretation der Messungen mit und ohne Bleischürze

In n=10 Fällen wurden zusätzliche Dosismessungen über den Vergleich über und unter einer Bleischürze vorgenommen. Die Dosimeter wurden dabei sowohl unter als auch über der Schürze auf Höhe der linken Brust angebracht, um eine möglichst korrekte

Vergleichbarkeit zu schaffen. Gemessen wurde an MP1, MP2 und MP4. An MP3 erfolgten keine Vergleichsmessungen aufgrund des erhöhten Bewegungsaufkommens an dieser MP. Der Bewegungsradius ist für die P3 um einiges höher, als an den anderen drei genannten Messpositionen (MP1, MP2, MP4). Aufhalten und Abschirmen von Gliedmaßen, sowie eine höhere Bewegung durch Re-Positionierung des Pferdes machen das Tragen einer Bleischürze in dieser Position deutlich impraktikabler, zudem ein permanentes Tragen der Schürzen unter Bewegung körperlich anstrengend ist. Da die Messungen den zeitlichen Verlauf und die normale Durchführung der Szintigrafie nicht behindern sollten, wurde an MP3 auf Vergleichsmessungen verzichtet.

In den Abb. 19, Abb.18 und

Abb. 21 wurden die DLs von MP1, MP2 und MP4 jeweils mit und ohne Bleischürze gegenübergestellt. Die deutliche Reduktion ist gut erkennbar.

Die Messungen an MP1 ergaben eine Dosisreduktion von 69%, die durchschnittliche Dosisleistung konnte von 192 $\mu\text{Sv/h}$ auf 59 $\mu\text{Sv/h}$ reduziert werden und entspricht somit einem Dosisreduktionsfaktor (DRF) von 3,2.

An MP 2 ergab sich ebenfalls eine Dosisreduktion von 68 % mit der Schürze. Die mittlere DL wurde von 17 $\mu\text{Sv/h}$ auf 5,4 $\mu\text{Sv/h}$ gesenkt und entspricht damit einem DRF von 3,1.

An MP3 konnte auch eine Dosisreduktion von 69% ermittelt werden. Die gemittelte DL wurde von 3,9 $\mu\text{Sv/h}$ auf 1,2 $\mu\text{Sv/h}$ gesenkt und beinhaltet somit einen DRF von 3,3.

Die bei dieser Messung getragenen Schürzen haben einen Bleigleichwert von 0,5 mm. Der physikalisch berechnete Absorptionskoeffizient einer 140 keV-Gammastrahlung beträgt 26,8 /cm, bei 120 keV 39,4 /cm, bei 100 keV 61,9 /cm und bei 80 keV 26,5 /cm. Die daraus berechneten Halbwertsdicken betragen 0,26 / 0,18 / 0,11 und 0,26 mm.

keV	μ	$d_{1/2}$ (mm)	A(0,5mm)	DRF
140	26,8	0,259	0,262	3,8
120	39,3	0,176	0,140	7,1
100	61,9	0,112	0,045	22,1
90	80,3	0,086	0,018	55,4
88	20,8	0,333	0,353	2,8
80	26,5	0,262	0,266	3,8
60	55,3	0,125	0,063	15,9

Tab. 20: Halbwertsdicken $d_{1/2}$ und Dosisreduktionsfaktoren DRF für Blei in Abhängigkeit von der Energie

In den Herstellangaben der in Einsatz gekommenen Bleischürzen wird bei Beschleunigungsspannungen der Röntgenröhre von 120 kV eine Schutzwirkung von 95% zugesichert (siehe Tab. 5), entsprechend einer Dosisreduktion um einen Faktor 20. Da das Röntgenspektrum ein Kontinuum darstellt mit einem Maximum bei etwa 2/3 der Beschleunigungsspannung, stimmt die Herstellerangabe gut mit den in Tab. 20 angegebenen Dosisreduktionsfaktoren überein.

Da der Energiebereich für Tc99m deutlich oberhalb des Energiespektrums bei einer Röntgenuntersuchung mit 120 kV liegt, konnte hier „nur“ eine Schutzwirkung von ca. 70% nachgewiesen werden. Trotz dieser Dosisreduktion wird in weiten Teilen auf das Anlegen von Bleiwesten in der Nuklearmedizin verzichtet. Zum einen sind die dabei gemessenen Dosen des humanmedizinischen Personals von ca. 0,6 μ Sv/Szintigrafie (Bayram et al. 2011) bis 1,3 μ Sv/Szintigrafie (Smart 2004) so gering, dass ein Überschreiten der Grenzwerte sehr unwahrscheinlich ist, zum anderen, da das Tragen der im Durchschnitt 8,5 kg schweren Schürzen bei längerem Gebrauch Rückenprobleme verursachen kann und im täglichen Gebrauch als unangenehm und störend empfunden wird. Zum anderen wird angeführt, dass durch eine Bleischürze Strahlung mit höherer Gammaenergie (durch den Comptoneffekt) in niederenergetische Strahlung umgewandelt wird. Dadurch würden im darunterliegenden Gewebe die niederenergetischen Photonen besser absorbiert (Fahey et al. 2016). Die Transformation einer 140-keV-Strahlung in ein niederenergetisches Strahlungsspektrum ist richtig, aber die Photonenzahl in diesem Spektrum ist deutlich geringer als in dem Originalspektrum. Außerdem werden 140-keV-Gammastrahlen durch 5 cm Wasser (oder Weichteilgewebe) zu 50% absorbiert.

Liegt also unterhalb einer Bleischürze der Körper mit einer Dicke von 20 cm, wird die Strahlung zu $(1 - 2^{-4}) = 15/16$ entsprechend 94% absorbiert. Wenn im selben Körper eine niederenergetische Strahlung zu fast 100% absorbiert würde, werden die unterschiedlichen 6% an Strahlung, die bei 140 keV nicht absorbiert werden, mehr als wettgemacht durch die Reduktion der Anzahl der Photonen.

Viele Autoren raten dazu, beim Umgang mit Radioaktivität in der Szintigrafie eine Bleiweste zu tragen (Bayram et al. 2011; Muir et al. 2005; Smart 2004; Steyn und Uhrig 2005; Gatherer et al. 2007; Dyson 2003). Die Praktikabilität einer Bleischürze variiert zwischen den verschiedenen Aufgabenbereichen. So könnte beispielsweise während des Haltens am Pferdekopf und während der Aufzeichnung der Bilder ohne größere Bewegungseinschränkung eine Bleischürze getragen werden. Die heutzutage vielfach in Einsatz kommenden Leichtgewicht-Bleiwesten, bestehend aus einem Materialgemisch aus Blei, Wolfram und Barium, wiegen 40% weniger als herkömmliche Bleiwesten und sind dadurch deutlich komfortabler. Wegen der insgesamt geringen Dosis, mit der bei der Szintigrafie von Pferden das Personal exponiert wird, erscheint aus Sicht der Messergebnisse das Tragen einer Bleischürze nicht nötig zu sein und kann nur dann empfohlen werden, wenn die Anzahl der Szintigraphien / Jahr die Obergrenzen, die in Tab. 18 genannt sind, erreicht.

4.12 Interpretation der Umfrage-Ergebnisse

Die Fragen bezogen sich in erster Linie auf den Strahlenschutz bzw. zielten darauf ab. Als erste Frage wurde zur Abschätzung der Exposition von Mitarbeitern die geschätzte monatliche Rate an Skelettszintigrafien erfragt. 2 der Teilnehmer gaben an bis zu 40 Szintigrafien im Monat durchzuführen, ein Großteil gab jedoch ca. 10-20 Szintigrafien im Monat an. Bei 40 Szintigrafien im Monat würden im Durchschnitt 2 Szintigrafien am Tag durchgeführt. Unter der Annahme, es handelt sich hierbei ausschließlich um Ganzkörper-Szintigrafien, käme eine Hilfskraft an MP2 auf eine Höchstdosis von ca. 1200 $\mu\text{Sv}/\text{Monat}$. Gerundet auf das ganze Jahr ergäbe sich eine Gesamtdosis von ca. 13 mSv, was deutlich unter der gesetzlich zulässigen Grenze von 20 mSv für beruflich strahlenexponiertes Personal der Kat. A liegt. Da die Beantwortung der zweiten Frage ergab, dass fast alle eine Dosierung von 10 MBq/kg KG wählten, können die normierten

Dosiswerte aus dieser Studie als Referenz verwendet werden. Auch die Sicherheitsmaßnahmen in Form von Schutzkleidung wurden von allen bejaht. Dennoch gab ein Teilnehmer an, keine Schutzkleidung zu benutzen, was in Punkto Strahlenschutz bedenklich ist. Bleischürzen werden von knapp 60 % der Befragten angelegt. Dieses uneinheitliche Management ist dem in weiten Teilen fehlendem Wissen über den möglichen Nutzen durch das Tragen von Bleischürzen in Energiebereichen von 140 keV und höher zuzuschreiben. Der Großteil der Kliniken, welche auf das Tragen einer Bleischürze verzichtet, kennt diese Art des Umganges aus dem Bereich der Humanmedizin. Dort wird schon lange in den meisten Praxen und Kliniken auf einen Bleischutz verzichtet. Andere Kliniken hingegen präferieren trotz des Gewichtes und des reduzierten Bewegungsspielraumes das Tragen einer Bleiweste.

Eine breite Unwissenheit über die Höhe der externen Strahlenbelastung bei szintigrafischen Aufnahmen am Pferd wurde anhand der Fragen 6 und 7 ersichtlich. Keiner der 14 Teilnehmer konnte eine Einschätzung über die Strahlungsintensität in Zusammenhang mit der Skelettszintigrafie geben. Auf die Frage, ob eine Einschätzung über Höhe der Strahlenbelastung pro Ganzkörperszintigrafie für anwesende Personen gemacht werden könne, antworten > 70 % mit: „nein, es würde mich aber interessieren“. Zusatzantworten beinhalteten viel zu geringe Dosisangaben von 2-3 $\mu\text{Sv}/\text{Szintigrafie}$ bzw. viel zu hohe mit 100 $\mu\text{Sv}/\text{Szintigrafie}$. Obwohl eine zeitaufwendige Beschäftigung mit der Szintigrafie erfolgt, sind die Mitarbeiter nicht aufgeklärt. Es sollte klar sein, wie hoch die Dosis üblicherweise ist und das Personal sollte man mit den Grundbegriffen des Strahlenschutzes und den Einheiten Sv, mSv und μSv vertraut sein.

Arbeitsmedizinische Vorsorge wird zwar nicht überall, aber teilweise mehr als eigentlich notwendig betrieben. Zur jährlichen ärztlichen Vorsorgeuntersuchung muss laut StrlSchV und RöV lediglich beruflich strahlenexponiertes Personal der Kat. A. Diese kann durch einen ermächtigten Arzt als Untersuchung oder als Beurteilung aufgrund vorliegender Daten ohne besondere Untersuchung erfolgen (§ 60 Abs. 2 StrlSchV und § 37 Abs. 2 RöV). Bei beruflich strahlenexponierten Personen der Kategorie B wird eine arbeitsmedizinische Vorsorge nur gefordert, wenn die Behörde dieses anordnet (Richtlinie zur Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) und zur Röntgenverordnung (RöV) 2003). Über 70 % der Befragten gaben an, in Kat. B eingeteilt zu sein, lediglich 14 % gaben an, in Kat. A eingeteilt zu sein. Dennoch werden deutlich mehr Routineuntersuchungen pro Jahr durchgeführt.

Bei den Antworten bezüglich der Einrichtungsdauer des Kontrollbereichs schwankten die Angaben von 24 h bis 72 h. Somit wird der Verbleib der Pferde von Klinik zu Klinik bis zu einem dreifachen der Zeit unterschiedlich gehandhabt. Viele Vorkehrungen werden übervorsichtig getroffen. Es ist nicht notwendig, ein Pferd 72 h Stunden „abstrahlen“ zu lassen, bevor es den Kontrollbereich verlassen und wieder nach Hause gegeben werden kann. Möglicherweise sind es unterschiedliche Auflagen der Aufsichtsbehörde, die entsprechende Vorgaben erlassen.

Das Tragen von Bleischürzen ist aufgrund der niedrigen Strahlenbelastung nicht zwangsläufig notwendig und kann bei intensiver Anwendung von schweren Bleiwesten sogar zu erheblichen Rückenschäden führen. Da das Tragen von Bleischürzen bei der Durchführung von Szintigrafien gesetzlich nicht geregelt wird, kann das Individuum selbst entscheiden, inwieweit eine Bleischürze getragen wird.

4.13 Fazit

Trotz der strengen Überwachung und der in Vergangenheit niedrigen ermittelten Dosen von strahlenexponiertem Personal ist es wichtig, Situationen, in welchen höhere Expositionen gemessen wurden, zu berücksichtigen und dementsprechend damit umzugehen. Zur Vermeidung unnötiger Strahlungsexposition sollte eine dem Körpergewicht des Tieres angepasste Dosis verabreicht werden. Hier hat sich eine gewichtsadaptierte spezifische Aktivität von 10 MBq/kg KG bewährt. Die Qualität der Bilder ist bei dieser Dosis sehr gut, eine höhere Dosierung ist nicht erforderlich. Eine höhere Aktivität erhöht die Strahlenexposition des Personals und ist nur dann erforderlich, wenn der zu untersuchende Patient sehr unruhig sein sollte.

Zur Minimierung der Strahlenbelastung lässt sich allgemein sagen, dass ein reibungsloser, zeitlich optimierter Ablauf während der Szintigrafie eine wichtige und zentrale Rolle für den Strahlenschutz spielt. Zur Dosisreduktion des Personals sollte immer auf ein schnelles und sicheres Arbeiten geachtet werden, damit die Zeit am Pferd so gering wie möglich gehalten wird und keine Verzögerungen durch beispielsweise eine unzureichende Sedierung oder nicht geschultes Personal eintritt. Eine Besetzung mit mindestens drei Leuten pro Knochenszintigrafie erscheint sinnvoll, da bei einer klaren Aufgabenverteilung erheblich an Zeit gespart und somit die Zeit der

Strahlenexposition verringert werden kann. Trotz der relativ geringen Dosen sollten die Strahlungsexposition einer Szintigrafie niemals unterschätzt und die nötigen Vorkehrungen für einen reibungslosen Ablauf im Voraus getroffen werden.

Mögliche negative Folgen oder aber gesundheitliche Nutzen einer Strahlenexposition im Niedrig-Dosisbereich sind bis heute noch unklar und in der Diskussion. Es gibt viele Hinweise, dass Arbeiten in nuklearmedizinischen Bereichen, wie beispielsweise in der equinen Skelettszintigrafie vollkommen unbedenklich sind. Die Meinungen bezüglich Hormesis auf der einen Seite und der potentiellen Gefahr einer Tumorinduktion auf der anderen Seite werden bis heute in Fachkreisen kontrovers diskutiert. Die Messergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass ein Überschreiten der gesetzlichen Grenze von 20 mSv/Jahr äußerst unwahrscheinlich ist. Die Festlegung dieses Grenzwertes ließe vermuten, dass alles oberhalb der Dosis von 20 mSv eine Gefahr für den menschlichen Organismus darstelle. Zu Bedenken gilt es allerdings, dass Experten den Bereich mit niedrigen und möglicherweise gesundheitlich unbedenklichen Dosen mit < 100 mSv bzw. mit Dosisleistungen von 1 mSv/h angeben, was um ein Vielfaches höher ist, als der Grenzwert des Gesetzesgebers.

Wie auch in dieser Arbeit wieder einmal festgestellt worden konnte, sind die drei A's im Strahlenschutz (Abstand, Aufenthalt und Abschirmung) die beste Möglichkeit, sich vor unerwünscht hoher Strahlenexposition zu schützen. Ein genügend hoher Abstand wie an MP4, eine verkürzte Aufenthaltsdauer, resultierend aus einem schnellen und zeitlich optimierten Arbeiten und eine Abschirmung - hier mit Bleiwesten getestet- reduzierten die effektive Dosis um ein Vielfaches. Da der Mensch keine Sinnesorgane für die Wahrnehmung von ionisierender Strahlung besitzt, muss der Strahlenschutz bei Tätigkeiten sowohl mit ionisierender Strahlung als auch mit Röntgenstrahlung beachtet werden.

5 Zusammenfassung

Theresa Sommerfeld

Strahlenexposition des Personals bei der Skelettszintigrafie mit Technetium 99m-Diphosphonat beim Pferd

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Ermittlung der Strahlenexposition durch Anbringung von sensitiven Dosimetern an veterinärmedizinischem Personal, das im Umfeld der equinen Skelettszintigrafie tätig ist. Die Untersuchung umfasste daher die Analyse und genaue Beschreibung der personellen Strahlenbelastung, die bei der Verwendung von Technetium 99m-Diphosphonat mittels Dosimetrie nachgewiesen werden kann. Außerdem wurde im Kontext dieser Dissertation eine Umfrage in verschiedenen Pferdekliniken durchgeführt. Sie ergab, dass über die Strahlenexposition bei der equinen Skelettszintigrafie teilweise erhebliche Wissensdefizite bestehen. Im Allgemeinen ist eine latente Skepsis des involvierten Personals gegenüber dem Verfahren der Skelettszintigrafie feststellbar, da die Relationen zu Dosisgrößen wenig bekannt sind und daher die Wirkungen der Exposition nicht korrekt eingeschätzt werden können.

Die Messungen der Strahlenexposition erfolgten während der routinemäßigen Skelettszintigrafie von Patienten in der Klinik für Pferde (Chirurgie) in Gießen. Bei 33 Skelettszintigrafien wurden umfangreiche Dosismessungen des Personals und der Pferde durchgeführt. Bei 10 weiteren Skelettszintigrafien wurden Vergleichsmessungen des Personals über und unter einer Bleischürze mit einem Bleigleichwert von 0,5 mm vorgenommen. Die Exposition wurde an unterschiedlichen Messpositionen (MP) untersucht: MP1 beinhaltete das Aufbereiten des Radiopharmazeutikums, MP2 maß die Exposition des Halters am Pferdekopf, MP3 maß die Exposition einer zusätzlichen Hilfskraft, die für die Positionierung und Abschirmung des Pferdes nötig war, und MP4 maß die Exposition des Personals, das die Gammakamera positionierte und die Bildaufzeichnung vornahm. Zudem wurden Dosismessungen an den Patienten direkt (MP5 und MP6), sowie in der Stallgasse des Kontrollbereiches durchgeführt (MP7). Um Einflüsse der Körperkonstitution der Patienten zu erfassen, wurden Körperdaten wie Gewicht, Größe, Umfang und Länge des Rumpfes festgehalten und mit den gemessenen Dosisleistungen (DL) des Personals am Kopf (DL2) und dem Dosimeter

am Rumpf des Patienten (DL5) verglichen. Dadurch sollten mögliche Unterschiede der Strahlenexposition bei großen, schwerkalibrigen und schmalen, dünnen Pferden festgestellt werden.

MP1 wurde im Durchschnitt mit $11\mu\text{Sv}$ belastet, MP2 während Ganzkörperszintigrafien mit $31\mu\text{Sv}$, während Teilkörperszintigrafien mit $23\mu\text{Sv}$. Die Dosisleistung DL betrug für MP2 $22\mu\text{Sv/h}$. MP3 erhielt eine gemittelte Dosis von $28\mu\text{Sv}$ während Ganz- und $19\mu\text{Sv}$ während Teilkörperszintigrafien bei einer DL von $19\mu\text{Sv/h}$. MP4 wurde mit $5\mu\text{Sv}$ bei Ganz- und mit ca. $3\mu\text{Sv}$ bei Teilkörperszintigrafien exponiert, die DL betrug $3\mu\text{Sv/h}$.

Die Messungen ergaben, dass an MP2 durch die Nähe und konstante Positionierung neben Knochenstrukturen ohne große Absorptionsschicht (Kopf) die höchste Dosis zu verzeichnen war. Zudem ergab sich hier eine schwache Korrelation zwischen der Dosisleistung an MP2 und dem Körpergewicht sowie dem Kaliber der Pferde. An MP3 wurden während der Anfertigung von Szintigrammen der Hintergliedmaßen trotz der größeren Nähe zur Blase keine wesentlich höheren Dosen gemessen, da die Strahlung aus der Blase durch den Weichteilmantel stark abgeschwächt wird. Der Unterschied zwischen der Dosisleistung an MP2 und MP3 erwies sich mit einem p-Wert von 0,008 als statistisch signifikant. Die Person an MP4 war aufgrund des gesteigerten Abstandes von ca. 1,5 Metern zur Strahlungsquelle deutlich niedrigeren Expositionen ausgesetzt. Auf Grundlage der gesetzlichen Dosisgrenzwerte für beruflich strahlenexponiertes Personal der Kat. B, können mit den festgestellten Dosiswerten an MP1 550 Ganzkörperszintigrafien (GKS), an MP2 190 GKS, an MP3 210 GKS und an MP4 1200 GKS pro Jahr durchgeführt werden. Für Personal in Kat. A erhöht sich die Zahl um den Faktor 3,3.

MP1, MP2 und MP4 wurden für die Vergleichsmessungen mit und ohne Bleischürze ausgewählt, da an diesen Positionen relativ wenig Bewegungsspielraum herrschte und das Tragen der Bleischürzen keine große Behinderung für das Personal darstellte. Die Vergleichsmessungen ergaben eine Dosisreduktion um ca. 70 % an allen Messpunkten. Strahlenschutz ist – vor allem im Bereich von niederen Dosen- im Allgemeinen ein sehr kontrovers diskutiertes Thema. Trotz der nachweisbaren Dosisreduktion bei Anwendung einer Bleischürze wird ihr Gebrauch in der nuklearmedizinischen Diagnostik nicht gesetzlich vorgeschrieben. In Fachkreisen wird die Wirkung aufgrund eines sogenannten strahlenhärtenden Effekts unter der Schürze

uneinig diskutiert. Demzufolge resultiert eine unterschiedliche Handhabung in der Verwendung der Bleischürzen, wie auch die Umfrage an diversen Fachkliniken zeigte.

Dem Leitgedanken der ICRP, welche das „Linear-No-Threshold“-Modell und das „ALARA“-Prinzip vertritt, steht für den Dosisbereich von niedriger Strahlung die Hypothese der Hormesis gegenüber. Da es bis heute keine eindeutigen wissenschaftlichen Beweise für das Eine oder das Andere gibt, bleibt für veterinärmedizinisches Personal die Empfehlung, die Dosis - trotz der festgestellten niedrigen Expositionen, die durch Skelettszintigrafien beim Pferd entstehen - durch Einhaltung der drei A's im Strahlenschutz (Abstand, Abschirmung, Aufenthaltszeit) auf ein Minimum zu beschränken.

6 Summary

Theresa Sommerfeld

Radiation exposure to personnel involved in bone scans for horses with technetium 99m-diphosphonat

Key objective of this study has been the evaluation of radiation exposure of veterinarian personnel wearing dosimeters which were involved in equine scintigraphy. A survey, which was developed in parallel to this study, showed that personnel in equine horse clinics have often knowledge gaps about scintigraphy and the related radiation doses. The survey showed skepticism of the involved personnel towards the methods of bone scintigraphy as the impacts of exposures are barely known in common.

The scintigraphic investigations and measurements were done at the horse clinic (department of surgery) in Giessen and were part of the routinely bone scanning of horses. A total of 33 bone scans were taken, covering either full- or half-body scintigraphies. Additional 10 bone scans covered measurements with and without the protection of a 0,5 mm lead-shield.

The activity of involved personnel was monitored at four different positions: MP1 was associated with the position of the person preparing the radiopharmaceutical for injection, MP2 with the position at holding the horse during the bone scan, MP3 with the position at holding the horse's legs and to make sure that the horse was standing in the right position, MP4 with the position for the camera operator. Some more dose measurements were made from the horse body (MP5 and MP6) as well as in the control area (MP7). In order to analyze the patient's constitution, additional data like weight, size, body extent and length of the torso were additionally captured. The body data were collected to investigate exposure differences of rather big and heavy or small and thin horses. These data and the dosimeter at the horse body (MP5) enabled the correlation analysis between the horse body composition and the received dose rate of the personnel (MP2). MP1 received a mean dose of 11 μSv and a dose rate of 123 $\mu\text{Sv/h}$, MP2 received 31 μSv for a whole-body and 23 μSv for a half-body bone scan. The dose rate of MP2 was 22 $\mu\text{Sv/h}$. MP3 was measured with an averaged dose of 28 μSv for a whole- and 19 μSv for a half-body bone scan. The dose-rate for MP3 was 19 $\mu\text{Sv/h}$. MP4 received 5 μSv for the whole-body scintigraphy and approximately 3 μSv for the incomplete body scintigraphy. The dose rate for MP4 was 3 $\mu\text{Sv/h}$.

The highest dose was recorded at MP2 and was caused by the close distance to the headbones of the horses. These bones have only a thin absorption layer which leads to a higher dose-rate in this area. A slightly correlation between the dose rate at MP2 and the body composition data of the horses was recognized. The dose rates went up when performing bone scans of horses with a heavy caliber and a higher bodyweight in general. The measurements at MP3 showed more variations than the ones at MP2, due to the different in soft tissue mass depending on body weight of the horses at this measuring point. The bladder as a big radiation source is covered well enough by surrounding soft-tissue which explains why MP3 did not reach a higher dose-rate standing next to this area. The comparison of the difference between the dose-rates of MP2 and MP3 has proven to be statistically significant with a p-value of 0.008. Through the enlarged distance between the radiation source and MP4, the camera operator received approximately factor 6 less of the dose received by the horse handler.

MP1, MP2 and MP4 were selected for the series of comparative measurements with and without lead shield protection because the positions were limited in moving as well as the wearing of lead shields has been less hindering to the personnel. The results of

the comparative measurement demonstrate up to 70 % dose reduction at all points if lead shields were used. Especially within the context of smaller doses radiation protection is in controversy discussion. The mandatory use of lead shield in nuclear-medical diagnostics is not regulated by law although the reduction of dose is evident by its use. Within the community of radiation experts the impact of the so called „beam hardening effect“ under the lead shield appears in opposed discussions. Therefore each medical center handles the use of lead shields individually, a matter of fact which was also mirrored by the survey of this dissertation.

With regards to lower radiation doses the „Hypothesis of Hormesis“ is contradictory to the ICRP rules, which cover the „Linear-No-Threshold-Model“ and the „ALARA-Principle“. As of today none of the before mentioned principles are confirmed by scientific investigations. Hence, veterinarian personnel shall reduce the dose consumption by obeying the three main principles for radiation protection: „Distance“, „Shielding“ and „Time of Exposure“.

7 Literaturverzeichnis

- **Ackermann, Hanns** (1997): Biometrische Analyse von Stichproben. 2. Aufl. Hochheim Epsilon-Verlag.
- **Archer, D. C.; Boswell, J. C.; Voute, L. C.; Clegg, P. D.** (2007): Skeletal scintigraphy in the horse: current indications and validity as a diagnostic test. In: Veterinary journal 173 (1), S. 31–44.
- **Attenburrow, D. P.; Bowring, C. S.; Vennart, W.** (1984): Radioisotope bone scanning in horses. In: Equine Veterinary Journal 16 (2), S. 121–124.
- **Auer, Jörg A.; Stick, John A.** (2012): Equine surgery. 4. Auflage: Elsevier/Saunders.
- **Baixeras, C.; Pérez, F.; Argüelles, D.** (2004): Radiation Hazards to Personnel from the Veterinary Scintigraphy Service of the Autonomous University of Barcelona (UAB).
- **Bayram, Tuncay; Yilmaz, A. Hakan; Demir, Mustafa; Sonmez, Bircan** (2011): Radiation dose to technologists per nuclear medicine examination and estimation of annual dose. In: Journal of nuclear medicine technology 39 (1), S. 55–59.
- **Brooks, Antone L.; Morgan, William F.; Feinendegen, Ludwig E.** (2016): 2015 Health Physics Society Symposium, Health Risks from Low Doses and Low Dose-Rates of Ionizing Radiation. In: Health physics 110 (3), S. 241–248.
- **Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)** (2009): Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide im Trinkwasser in der Bundesrepublik Deutschland
- **Bundesumweltministerium (2004)**: Radon Merkblätter zur Senkung der Radonkonzentration in Wohnhäusern. Broschüre des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Gesundheit

- **Busse, Stadler, Geburek** (2008): Strahlenexposition der Hilfspersonen bei dosisintensiven Standardradiographien am Pferd. In: Pferdeheilkunde 24, S. 428-432
- **Brosius, F.** (1999): SPSS 8.0, Kapitel 21. Mitp-Verlag, S.503-504
- **Cardis, E.; Vrijheid, M.; Blettner, M.; Gilbert, E.; Hakama, M.; Hill, C. et al.** (2005): Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries. In: BMJ 331 (7508), S. 77.
- **Daniel, A. J.; Judy, C.; Rick, M.; Saveraid, T.; Herthel, D.** (2012): Comparison of radiography, nuclear scintigraphy, and magnetic resonance imaging for detection of specific conditions of the distal tarsal bones of horses: 20 cases (2006-2010). In: Journal of the American Veterinary Medical Association 240 (9), S. 1109–1114.
- **Debus, J.; Kuhn, F. P.; Reiser, M.; Bartenstein, P.; Beitzel, K.** (2011): Duale Reihe Radiologie: Thieme.
- **Devous M.D. und Twardock A. R.** (1984): Techniques and Application of Nuclear Medicine in the Diagnosis of Equine Lameness. In: Journal American Veterinary Medicine Association JAVMA (184 (3)), S. 818-325.
- **Dixon, Wilfrid Joseph** (1993): BMDP statistical software manual. To accompany BMDP release 7. Berkeley: University of California Press.
- **Dyson, S. J.; Weekes, J. S.; Murray, R.** (2006): How useful is nuclear scintigraphy in the diagnosis and management of proximal suspensory desmitis in the horse? In: AAEP Proceedings Vol. 52 , S. 405 - 411
- **Dyson, Sue** (2014): Musculoskeletal Scintigraphy of the Equine Athlete. Veterinary Nuclear Medicine. In: Seminars in nuclear medicine 44 (1), S. 4–14.
- **Dyson, Sue J., Pilsworth, W., Twardock A., Martinelli M.** (2003): Equine scintigraphy. 1. Aufl. Equine Veterinary Journal.
- **Fahey, Frederic H.; Goodkind, Alison; Treves, S. Ted; Grant, Frederick D.** (2016): Nuclear Medicine and Radiation Protection. In: Journal of Radiology Nursing 35 (1), S. 5–11.

- **Feinendegen, Ludwig E.** (2016): Quantification of Adaptive Protection Following Low-dose Irradiation. In: Health physics 110 (3), S. 276–280.
- **Feinendegen, Ludwig E.; Pollycove, Myron; Neumann, Ronald D.** (2010): Low-dose cancer risk modeling must recognize up-regulation of protection. In: Dose-Response: An International Journal 8 (2).
- **Gatherer, M. E.; Faulkner, J.; Voute, L. C.** (2007): Exposure of veterinary personnel to ionising radiation during bone scanning of horses by nuclear scintigraphy with 99m Technetium methylene diphosphonate. In: The Veterinary record 160 (24), S. 832–835.
- **Harding, Mostafa, Rodden, Williams** (1984): Dose rates from patients having nuclear medicine investigations. In Nuclear medicine communications 6, S.191-194
- **Huchzermeyer, Susanne** (2015): Die szintigrafische Untersuchung im Rahmen der Lahmheitsdiagnostik beim Pferd. In: Pferdespiegel 18 (02), S. 56–64.
- **ICRP Publication 53** (2014): S. Mattsson, L. Johansson, S. Leide Svegborn, J. Liniecki, D. Noßke, M. Stabin, D. Taylor, K. Åhlström Riklund, W. Bolch, S. Carlsson, K. Eckerman, A. Giussani, L. Söderberg, S. Valind. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals
- **ICRP Publication 60:** ICRP Publication 60. ICRP, 1991. 1990
Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.
ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).
- **ICRP Veröffentlichung 103:** Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) von 2007. BfS
- **Kauffmann, Günter; Sauer, Rolf; Weber, Wolfgang** (2013): Radiologie. Bildgebende Verfahren, Strahlentherapie, Nuklearmedizin und Strahlenschutz. 4. Aufl. : Urban Fischer Verlag
- **Kiefer, Jürgen; Kiefer, Ingmar** (2003): Allgemeine Radiologie. Strahlenanwendung, Strahlenwirkung, Strahlenschutz; mit 23 Tabellen: Parey-Verlag

- **Kohlrausch, Friedrich** (1996): Praktische Physik. Band 2, 24. Auflage: B.G. Teubner Stuttgart
- **Kreuzer, Michaela; Auvinen, Anssi; Cardis, Elisabeth; Hall, Janet; Jourdain, Jean-Rene; Laurier, Dominique et al.** (2015): Low-dose ionising radiation and cardiovascular diseases – Strategies for molecular epidemiological studies in Europe. In: Mutation Research/Reviews in Mutation Research 764, S. 90–100.
- **Krieger, Hanno** (2007): Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden.
- **Krieger, Hanno** (2013): Strahlungsmessung und Dosimetrie. 2. überarbeitete und erweiterte Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer.
- **Laurier, D.; Guseva Canu, I.; Baatout, S.; Bertho, J.-M.; Blanchardon, E.; Bouffler, S. et al.** (2012): DoReMi workshop on multidisciplinary approaches to evaluating cancer risks associated with low-dose internal contamination. In: Radioprotection 47 (1), S. 119–148.
- **Lloyd, K. C.; Koblik, P.; Ragle, C.; Wheat, J. D.; Lakritz, J.** (1988): Incomplete palmar fracture of the proximal extremity of the third metacarpal bone in horses: ten cases (1981-1986). In: Journal of the American Veterinary Medical Association 192 (6), S. 798–803.
- **Luckey T.D.** (2008): The health effects of low-dose Ionizing radiation. In Journal of American Physicians and Surgeons Vol.12 No. 2, S.39-42
- **MacKey, Valorie S.; Trout, Donald R.; Meagher, Dennis M.; Hornof, William J.** (1987): Stress Fractures of The Humerus, Radius, and Tibia in Horses. In: Veterinary Radiology 28 (1), S. 26–31.
- **Markel, M. D.; Snyder, J. R.; Hornof, W. J.; Meagher, D. M.** (1987): Nuclear scintigraphic evaluation of third metacarpal and metatarsal bone fractures in three horses. In: Journal of the American Veterinary Medical Association 191 (1), S. 75–77.

- **Martinelli, M. J.; Chambers, M. D.** (1995): Equine nuclear bone scintigraphy: physiological principles and clinical application. In: Equine Veterinary Education 7 (5), S. 281–287.
- **McColl, Neil; Auvinen, Anssi; Kesminiene, Ausrele; Espina, Carolina; Erdmann, Friederike; Vries, Esther de et al.** (2015): European Code against Cancer 4th Edition: Ionising and non-ionising radiation and cancer. In: Cancer epidemiology 39 Suppl. 1, S.93-S100.
- **Mehlhorn, Günther** (1964): Grundlagen der Nuklearmedizin für Tierärzte
- **Medical Imaging Electronics** Bedienungsanleitung 12/2009 „Equine Scanner H.R.“
- **Mothersill, Carmel; Seymour, Colin** (2014): Implications for human and environmental health of low doses of ionising radiation. Environmental Radioactivity: Implications for Human and Environmental Health - International Symposium at Plymouth University, UK. In: Journal of environmental radioactivity 133, S. 5–9.
- **Muir, S.; McLeod, R.; Dove, R.** (2005): Light-weight lead aprons — light on weight, protection or labelling accuracy? In: Australas. Phys. Eng. Sci. Med. 28 (2), S. 128–130.
- **National Research Council Committee's Report** (2004): Health Risks from Exposure to low Level of Ionizing Radiation 2004.
- **Neuwirth, L.; Romine, C.** (2000): Ancillary equipment to increase quality and reduce radiation exposure in the equine nuclear medicine laboratory. In: Veterinary radiology & ultrasound: the official journal of the American College of Veterinary Radiology and the International Veterinary Radiology Association 41 (5), S. 470–475.
- **O'Callaghan, M. W.; Hornof, W. J.; Fisher, P. E.; Rabbe, O. G.** (1987): Ventilation imaging in the horse with 99mtechnetium-DTPA radioaerosol. In: Equine Veterinary Journal 19 (1), S. 19–24.
- **Parker, R. A.; Bladon, B. M.; Parkin, T. D. H.; Fraser, B. S. L.** (2010): Quantitative evaluation of subchondral bone injury of the plantaro-lateral

condyles of the third metatarsal bone in Thoroughbred horses identified using nuclear scintigraphy: 48 cases. In: Equine Veterinary Journal 42 (6), S. 552–557.

- **Pilsworth, R. C.; Webbon, P. M.** (1988): The use of radionuclide bone scanning in the diagnosis of tibial 'stress' fractures in the horse: a review of five cases. In: Equine veterinary journal. Supplement (6), S. 60–65.
- **Richtlinie zur Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) und zur Röntgenverordnung (RöV)** (2003): Arbeitsmedizinische Vorsorge beruflich strahlenexponierter Personen durch ermächtigte Ärzte - Richtlinie zur Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) und zur Röntgenverordnung (RöV) zuletzt aktualisiert am 04.05.2016, zuletzt geprüft am 05.05.2016.
- **Richtlinie Strahlenschutz in der Tierheilkunde** (2005); Tierärztekammer Berlin, BMU RS II 4-11432/7.
- **Römer, Wolfgang** (2010): Skelettszintigraphie. In: DoctorConsult - The Journal. Wissen für Klinik und Praxis 1 (2), S. 121-136.
- **Röntgenverordnung (RöV)**, Stand 2010
- **Roth, Jakob** (2008): Strahlenschutz in der Medizin. Praktische Anleitung zum Strahlenschutz in Röntgendiagnostik, Nuklearmedizin und Strahlentherapie. 1. Aufl. Bern: Huber.
- **Schicha, Harald; Schober, Otmar; Dietlein, Markus** (2007): Nuklearmedizin. Basiswissen und klinische Anwendung; mit 66 Tabellen und 101 Kasuistiken. 6., überarb. und aktualisierte Aufl. Stuttgart: Schattauer.
- **Simon, Valerie; Dyson, Sue J.** (2012): Radiographic and scintigraphic evaluation of the third carpal bone of control horses and horses with carpal lameness. In: Veterinary radiology & ultrasound: the official journal of the American College of Veterinary Radiology and the International Veterinary Radiology Association 53 (4), S. 465–473.
- **Smart, Richard** (2004): Task-specific monitoring of nuclear medicine technologists' radiation exposure. In: Radiation protection dosimetry 109 (3), S. 201–209.

- **Steyn, P.; Uhrig, J.** (2005): The role of protective lead clothing in reducing radiation exposure rate of personnel during equine bone scintigraphy. In: Veterinary Radiology & Ultrasound 46 (6), S. 529–532.
- **Stover, S. M.; Hornof, W. J.; Richardson, G. L.; Meagher, D. M.** (1986): Bone scintigraphy as an aid in the diagnosis of occult distal tarsal bone trauma in three horses. In: Journal of the American Veterinary Medical Association 188 (6), S. 624–628.
- **Strahlenschutzkommission** (1998): Strahlenexposition von Personen durch nuklearmedizinisch untersuchten Patienten. Bundesanzeiger Nr. 208 vom 05. November 1998
- **Strahlenschutzverordnung** (2012): Strahlenschutzverordnung.
- **Theodorakis, M. C.; Bermudez, A. J.; Manning, J. P.; Koritz, G. D.; Hillidge, C. J.** (1982): Liver scintigraphy in ponies. In: American journal of veterinary research 43 (9), S. 1561–1565.
- **Tubiana, Maurice; Feinendegen, Ludwig E.; Yang, Chichuan; Kaminski, Joseph M.** (2009): The Linear No-Threshold Relationship Is Inconsistent with Radiation Biologic and Experimental Data 1. In: Radiology 251 (1), S. 13–22.
- **Ueltschi, G.** (1977): Bone and Joint Imaging with ^{99m}Tc Labelled Phosphates as a New Diagnostic Aid in Veterinary Orthopedics¹. In: Veterinary Radiology 18 (3), S. 80–89.
- **Ueltschi, G.** (1987): Die Skelettszintigrafie beim Pferd. 1. Teil: Einführung. Pferdeheilkunde 3 (1987) 2 (März) 99-104.
- **Voute, L. C.; Webbon, P. M.; Whitelock, R.** (1995): Rules, regulations and safety aspects of scintigraphy. In: Equine Veterinary Education 7 (3), S. 169–172.
- **Wakeford, Richard; Tawn, E. Janet** (2010): The meaning of low dose and low dose-rate. In: J. Radiol. Prot. 30 (1), S. 1–3.
- **Warren-Forward, Helen; Cardew, Paul; Smith, Bradley; Clack, Llewellyn; McWhirter, Kym; Johnson, Stacey; Wessel, Kimberly** (2007): A comparison

of dose savings of lead and lightweight aprons for shielding of 99m-Techne-
tium radiation. In: Radiation protection dosimetry 124 (2), S. 89–96.

- **Weaver M.P.** (1995): Twenty years of equine scintigraphy - a coming of age? In: Equine Veterinary Journal 27 (3), S. 163–165.
- **Whitelock, R. G.** (1997): Radiation hazards from horses undergoing scintigraphy using technetium-99m. In: Equine Veterinary Journal 29 (1), S. 26–30.
- **Winter, Matthew D.; Berry, Clifford R.; Reese, David J.** (2010): Nuclear scintigraphy in horses. In: Compendium (Yardley, PA) 32 (12), S. 5.

8 Anhang

Formel-Verzeichnis

Formel 1: Berechnung der Äquivalentdosis	16
Formel 2: Berechnung effektive Dosis H_{eff}	17
Formel 3: Berechnung Referenzvolumen.....	39
Formel 4: Zerfallsgesetz	75

8.1 Tabellen-Verzeichnis

Tab.1: Dosisgrenzwerte für beruflich strahlenexponiertes Personal der Kat. A und Kat. B	15
Tab. 2: Strahlungswichtungsfaktoren w_R	16
Tab. 3: Gewebewichtungsfaktoren im Laufe der Zeit.....	18
Tab. 4: Anbringung der Dosimeter und Beschreibung der Messpositionen	32
Tab. 5: Angegebene Daten des Herstellers über Schutzwirkung der verwendeten Röntgenschrürzen	35
Tab. 6: Beschreibung der Aufnahmen für GKS, TKS vorne und hinten	38
Tab. 7: Messdaten der Patienten 1 - 33 an MP1	42
Tab. 8: Dauer in Minuten für GKS und TKS der Patienten 1 - 33	43
Tab. 9: Dosis u. Dosisleistung aller Patienten für MP2, MP3 u. MP4. Originalwerte u. auf 10 MBq/kg KG normierte Werte	47
Tab. 10: Für GKS und TKS Dosis u. Dosisleistung für MP2-MP4. Originalwerte u. auf 10 MBq/kg KG normierte Werte	47
Tab. 11: Dosis und Dosisleistung aller Patienten im Zeitverlauf von 2 bis 12 h p.i. für MP5. Originalwerte und auf 10 MBq/kg KG normierte Werte.....	49
Tab. 12: Dosis und Dosisleistung aller Patienten im Zeitverlauf von 2 bis 12 h p.i. für MP6. Originalwerte und auf 10 MBq/kg KG normierte Werte.....	50
Tab. 13: Zerfall von Tc99m	51
Tab. 14: Dosis und Dosisleistung aller Patienten im Zeitverlauf von 2 bis 12 h p.i. für MP7. Originalwerte und auf 10 MBq/kg KG normierte Werte.....	52
Tab. 15: Dosiswerte MP2 u. MP3 unterteilt in GKS und TKS (originale und auf 10 MBq/kg KG gemittelte Werte).....	54
Tab.16: Ergebnisse Vergleich mit und ohne Bleischürze MP1, MP2 und MP4 normierte Werte auf 10 MBq/kg KG	56
Tab. 17: Gerundete „zulässige“ Aufnahmezahlen/Jahr für MP2-MP4 in Kat. A u. Kat. B bei Applikation von „Normaktivitäten“ von 10 MBq/kg KG.....	70
Tab. 18: „Zulässige“ Aufnahmezahlen/Jahr für MP2-MP4 in Kat. A u. Kat. B für mittlere Untersuchungsdauern von 1 und 2 h	71
Tab.19: Berechnung der Halbwertszeit $t_{1/2}$ in MP5 zum fiktiven Messzeitpunkt.....	75

Tab. 20: Halbwertsdicken $d_{1/2}$ und Dosisreduktionsfaktoren DRF für Blei in Abhängigkeit von der Energie	82
Tab. 21: Messdaten Patient Nr. 01	103
Tab. 22: Messdaten Patient Nr. 02	104
Tab. 23: Messdaten Patient Nr. 03	105
Tab. 24: Messdaten Patient Nr. 04	105
Tab. 25: Messdaten Patient Nr. 05	105
Tab. 26: Messdaten Patient Nr. 06	106
Tab. 27: Messdaten Patient Nr. 07	107
Tab. 28: Messdaten Patient Nr. 08	107
Tab. 29: Messdaten Patient Nr. 09	108
Tab. 30: Messdaten Patient Nr. 10	108
Tab. 31: Messdaten Patient Nr. 11	108
Tab. 32: Messdaten Patient Nr. 12	109
Tab. 33: Messdaten Patient Nr. 13	109
Tab. 34: Messdaten Patient Nr. 14	110
Tab. 35: Messdaten Patient Nr. 15	110
Tab. 36: Messdaten Patient Nr. 16	111
Tab. 37: Messdaten Patient Nr. 17	111
Tab. 38: Messdaten Patient Nr. 18	112
Tab. 39: Messdaten Patient Nr. 19	112
Tab. 40: Messdaten Patient Nr. 20	113
Tab. 41: Messdaten Patient Nr. 21	113
Tab. 42: Messdaten Patient Nr. 22	113
Tab. 43: Messdaten Patient Nr. 23	114
Tab. 44: Messdaten Patient Nr. 24	114
Tab. 45: Messdaten Patient Nr. 25	114
Tab. 46: Messdaten Patient Nr. 26	115
Tab. 47: Messdaten Patient Nr. 27	115
Tab. 48: Messdaten Patient Nr. 28	115
Tab. 49: Messdaten Patient Nr. 29	116
Tab. 50: Messdaten Patient Nr. 30	117
Tab. 51: Messdaten Patient Nr. 31	117
Tab. 52: Messdaten Patient Nr. 32	117
Tab. 53: Messdaten Patient Nr. 33	118

Tab. 54: DL2 u. DL5 (norm.) mit Körperdaten der Patienten	118
---	-----

8.2 Abbildungs-Verzeichnis

Abb. 1: Darstellung eines Kollimators mit Anordnung der Septen (Beschreibung im Text)	7
Abb. 2: Zerfallsschema Mo99 zu Ru99	8
Abb. 3: Räumlichkeiten der Szintigrafie mit Beschreibung der Messpositionen	29
Abb. 4: Anbringung Dosimeter an MP5 u. MP6 mittels elastischer Binden.....	31
Abb. 5: Anbringung des Dosimeters (MP7) an der Pferdebox	32
Abb. 6: RAD-60SE Personen-Alarmdosimeter.....	33
Abb. 7: Bsp. Szintigramm Tarsus 180°	34
Abb. 8: Bsp. Szintigramm Bearbeitung Count-Profil	34
Abb. 9: Bsp. Szintigramm Ermittlung ROI	34
Abb. 10: Anbringung Dosimeter am Personal unter und über der Schürze	37
Abb. 11: Vermessungsstellen am Pferderumpf U1, U2 und U3 zur Berechnung des Referenzvolumens	40
Abb. 12: Dosis MP2 mit normierten Werten in Abhängigkeit der Zeit	44
Abb. 13: Dosis MP3 mit normierten Werten in Abhängigkeit der Zeit	45
Abb. 14: Dosis MP4 mit normierten Werten in Abhängigkeit der Zeit	46
Abb.15: MP5 und MP6 im Zeitverlauf 2,4,6, und 12 h p.i.....	51
Abb. 16: MP7 2,4,6 und 12 h p.i.....	53
Abb. 17: Dosiswerte bei MP2 und MP3 für GKS und TKS.....	54
Abb.18: Korrelation von DL2 und DL3.....	55
Abb. 19: Vergleich DL1 mit und ohne Abb. 20: Vergleich DL2 mit und ohne.....	56
Abb. 21: Vergleich DL4 mit und ohne Bleischürze	56
Abb. 22: Korrelation von DL2 (normiert) und Gewicht.....	57
Abb. 23: Korrelation von DL5 (normiert) und Gewicht.....	57
Abb.24: Korrelation von DL2 (normiert) und Kaliber	58
Abb. 25: Korrelation von DL5 (normiert) und Kaliber	58
Abb. 26: Korrelation von DL2 und Referenzvolumen	58
Abb. 27: Korrelation von DL5 und Referenzvolumen	58
Abb. 28: Dosisleistung im Zeitverlauf (Patient: 4)	65
Abb. 29: MP2 bei Aufnahme der HWS.....	66
Abb. 30 Schwankungen der normierten DL2 im Zeitverlauf.....	68
Abb. 31 Schwankungen der normierten DL3	68

Abb.32: Positionierung für 180° Aufnahme der Hintergliedmaßen.....69

8.3 Einzeldaten der szintigrafischen Untersuchung

Datenblatt zur Szintigrafie von Pferden																																					
Patient Nr.	1		Umfang Widerrist (cm):				197		Länge Rumpf (cm):				63		Aktivität (GBq):				7,1		Geschlecht:				Wallach				A [MBq/kg]				11,3				
Gewicht (kg):	630		Umfang Mitte (cm):				227		Länge Körper (cm):				174		Rasse:				Andalusier		Vorstellungsgrund:				LH HL seit 2 W												
Größe (cm):	160		Umfang Lende (cm):				204		Referenzvolumen (dm3):				229		Alter (Jahre):				6		Art:				1/1 Szinti												
time	At	t abs	MP1:				MP2:				MP3:				MP4:				MP5:				MP6:				MP7:				MP1'	MP2'	MP3'	MP4'	MP5'	MP6'	MP7'
			H1	H1_diff1	t_diff1	H1	H1_diff1	t_diff1	H2	H2_diff2	t_diff2	H3	H3_diff3	t_diff3	H4	H4_diff4	t_diff4	H5	H5_diff5	t_diff5	H5	H5_diff5	t_diff5	H5	H5_diff5	t_diff5	H5	H5_diff5	t_diff5	H5	H5_diff5	t_diff5					
			[µSv]	[µSv]	[min]	[µSv]	[µSv]	[min]	[µSv]	[µSv]	[min]	[µSv]	[µSv]	[min]	[µSv]	[µSv]	[min]	[µSv]	[µSv]	[min]	[µSv]	[µSv]	[min]	[µSv]	[µSv]	[min]	[µSv/min]	[µSv/min]	[µSv/min]	[µSv/min]	[µSv/min]	[µSv/min]	[µSv/min]				
08:48	000	000	0	0	000										0	0	000	0	0	000	0	0	000	0	0	000	3,40										
08:53	005	005	17	17	005										37	37	012	33	33	012	2	2	012							3,08	2,75	0,17					
09:05	012	017													82	45	017	78	45	017	5	3	017							2,65	2,65	0,18					
09:22	017	034																																			
09:53															142	60	031																				
10:15	053	087													184	102	053	187	109	053	10	5	053							1,92	2,06	0,09					
10:53															235	51	038																				
10:59	044	131				0	0	000	0	0	000				243	59	044	233	46	044	21	11	044							1,34	1,05	0,25					
11:10	011	142				4	4	011	3	3	011	0	0	000	257	14	011	245	12	011	22	1	011		0,36	0,27			1,27	1,09	0,09						
11:20	010	152				8	4	010	5	2	010	1	1	010	268	11	010	255	10	010	25	3	010		0,40	0,20	0,10	1,10	1,00	0,30							
11:30	010	162				13	5	010	11	6	010	1	0	010	280	12	010	265	10	010	26	1	010		0,50	0,60	0,00	1,20	1,00	0,10							
11:40	010	172				18	5	010	15	4	010	4	3	010	288	8	010	272	7	010	27	1	010		0,50	0,40	0,30	0,80	0,70	0,10							
11:50	010	182				22	4	010	19	4	010	6	2	010	297	9	010	280	8	010	28	1	010		0,40	0,40	0,20	0,90	0,80	0,10							
11:53															300	3	003																				
12:00	010	192				28	6	010	24	5	010	7	1	010	308	11	010	289	9	010	29	1	010		0,60	0,50	0,10	1,10	0,90	0,10							
12:10	010	202				33	5	010	29	5	010	8	1	010	317	9	010	296	7	010	29	0	010		0,50	0,50	0,10	0,90	0,70	0,00							
12:15	005	207				36	3	005	31	2	005	9	1	005	322	5	005	301	5	005	32	3	005		0,60	0,40	0,20	1,00	1,00	0,60							
12:40	025	232				38	2	025	32	1	025	9	0	025	343	21	025	318	17	025	38	6	025		0,08	0,04	0,00	0,84	0,68	0,24							
12:50	010	242				42	4	010	32	0	010	9	0	010	354	11	010	327	9	010	39	1	010		0,40	0,00	0,00	1,10	0,90	0,10							
12:53															355	1	003																				
13:00	010	252				46	4	010	32	0	010	9	9	010	357	3	010	330	3	010	40	1	010		0,40	0,00	0,90	0,30	0,30	0,10							
13:53															405	48	053																				
14:20	080	332													430	73	080	397	67	080	67	27	080					0,91	0,84	0,34							
15:30	070	402													459	29	070	424	27	070	77	10	070					0,41	0,39	0,14							
17:00	090	492													513	54	090	473	49	090								0,60	0,54								
20:00	180	672													558	45	180	513	40	180								0,25	0,22								
22:30	150	822													606	48	150	559	46	150	144	67	420					0,32	0,31	0,16							
04:00	330	1152													668	62	330	618	59	330								0,19	0,18								
																							ø dose [µSv/min]:		3,40	0,43	0,30	0,19									
																							ø dose [µSv/h]:		204,00	25,87	18,07	11,40									

Tab. 21: Messdaten Patient Nr. 01

Anhang

[illegible]

Tab. 22: Messdaten Patient Nr. 02

Datenblatt zur Szintigrafie von Pferden																															
Patient Nr.	3		Umfang Widerrist (cm):				202	Länge Rumpf (cm):				72	Aktivität (GBq):				7,1	Geschlecht:				Stute		A [MBq/kg]						12,5	
Gewicht (kg):	568		Umfang Mitte (cm):				226	Länge Körper (cm):				169	Rasse:				Hannoveraner	Vorstellungsgrund:				LH HL VL									
Größe (cm):	167		Umfang Lende (cm):				196	Referenzvolumen (dm3):				259	Alter (Jahre):				12	Art:				Ganze Szinti									
	At	tabs	MP1:			MP2:			MP3:			MP4:			MP5:			MP6:			MP7:			MP1'	MP2'	MP3'	MP4'	MP5'	MP6'	MP7'	
time	[min]	[min]	H1 [sVs]	H1_diff1 [sVs]	t_diff1 [min]	H1 [sVs]	H1_diff1 [sVs]	t_diff1 [min]	H2 [sVs]	H2_diff1 [sVs]	t_diff1 [min]	H3 [sVs]	H3_diff1 [sVs]	t_diff1 [min]	H4 [sVs]	H4_diff1 [sVs]	t_diff1 [min]	H5 [sVs]	H5_diff1 [sVs]	t_diff1 [min]	H5 [sVs]	H5_diff1 [sVs]	t_diff1 [min]	H1/1 [sVs/min]	H1/2 [sVs/min]	H1/3 [sVs/min]	H1/4 [sVs/min]	H1/5 [sVs/min]	H1/5 [sVs/min]	H1/5 [sVs/min]	
08:40	000	000	0	0	000																										
08:45	005	000	14	14	005										0	0	000	0	0	000	0	0	000	2,80							
08:57	012	012													32	32	012	35	35	012	1	1	012								
09:57	060	072													189	157	060	198	163	060	7	6	060								
10:30	033	105													261	72	033	270	72	033	10	3	033								
10:50	020	125				0	0	000	0	0	000	0	0	000	291	30	020	300	30	020	11	1	020								
11:00	010	135				6	6	010	4	4	010	2	2	010	303	12	010	314	14	010	11	0	010								
11:10	010	145				11	5	010	9	5	010	2	0	010	318	15	010	329	15	010	11	0	010								
11:24	014	159				18	7	014	12	3	014	4	2	014	334	16	014	345	16	014	11	0	014								
11:30	006	165				19	1	006	15	3	006	8	4	006	342	8	006	352	7	006	11	0	006								
11:40	010	175				22	3	010	22	7	010	9	1	010	355	13	010	365	13	010	12	1	010								
11:50	010	185				28	6	010	30	8	010	9	0	010	367	12	010	377	12	010	12	0	010								
12:00	010	195				30	2	010	35	5	010	9	0	010	380	13	010	389	12	010	12	0	010								
12:03	003	198				32	2	003	36	1	003	9	0	003	383	3	003	393	4	003	12	0	003								
12:33	030	228				33	1	030				10	1	030	416	33	030	419	26	030	16	4	030								
12:43	010	238				36	3	010				10	0	010	426	10	010	426	7	010	18	2	010								
12:45	002	240				37	1	002				10	0	002	428	2	002	428	2	002	18	0	002								
14:00	075	315													495	67	075	480	52	075	32	14	075								
14:45	045	360													533	38	045	512	32	045	38	6	045								
16:00	075	435													591	58	075	566	54	075	51	13	075								
17:00	060	495													598	7	060	630	64	060	58	7	060								
18:00	060	555													633	35	060	632	2	060	60	2	060								
19:00	060	615													670	37	060	635	3	060	65	5	060								
20:00	060	675													710	40	060	670	35	060	74	9	060								
21:00	060	735													735	25	060	697	27	060	81	7	060								
22:00	060	795													755	20	060	711	14	060	85	4	060								
01:00	060	975													790	35	180	745	34	180	92	7	180								
02:00	060	1035													800	10	060	755	10	060	95	3	060								
04:00	120	1155													822	22	120	774	19	120	99	4	120								
07:00	180	1335													847	25	180	794	20	180	105	6	180								
10:00	180	1515													860	13	180	807	13	180	109	4	180								
11:00	060	1575													865	5	060	812	5	060	110	1	060								
12:00	060	1635													867	2	060	815	3	060	111	1	060								
13:00	060	1695													869	2	060	818	3	060	111	0	060								
14:00	060	1755													871	2	060	821	3	060	112	1	060								
20:00	360	2115													880	9	360	833	12	360	116	4	360								
21:00	060	2175													881	1	060	838	5	060	117	1	060								

Tab. 23: Messdaten Patient Nr. 03

Datenblatt zur Szintigrafie von Pferden																																		
Patient Nr.	4		Umfang Widerrist (cm):						162	Länge Rumpf (cm):						53	Aktivität (GBq):				5,1	Geschlecht:		Wallach				A [MBq/kg]						16,2
Gewicht (kg):	314		Umfang Mitte (cm):						182	Länge Körper (cm):						142	Rasse:				Islander	Vorstellungsgrund:		LH VR + HL + HR										
Größe (cm):	132		Umfang Lende (cm):						172	Referenzvolumen (dm3):						129	Alter (Jahre):				7	Art:		1/1 Szinti										
	At	tabs	MP1:			MP2:			MP3:			MP4:			MP5:			MP6:			MP7:			MP1'	MP2'	MP3'	MP4'	MP5'	MP6'	MP7'				
time	[min]	[min]	H1 [sV]	H1_diff1 [sV]	t_diff1 [min]	H1 [sV]	H1_diff1 [sV]	t_diff1 [min]	H2 [sV]	H2_diff1 [sV]	t_diff2 [min]	H3 [sV]	H3_diff1 [sV]	t_diff3 [min]	H4 [sV]	H4_diff1 [sV]	t_diff4 [min]	H5 [sV]	H5_diff1 [sV]	t_diff5 [min]	H5 [sV]	H5_diff1 [sV]	t_diff5 [min]	H1/1 [sV/min]	H1/2 [sV/min]	H1/3 [sV/min]	H1/4 [sV/min]	H1/5 [sV/min]	H1/5 [sV/min]	H1/5 [sV/min]				
08:22	000	000	0	0	000											0	0	000	0	0	000		0	0	000	2,50								
08:30	008	008	20	20	008											101	101	020	84	84	020	4	4	020										
08:50	020	028														163	62	020	169	85	020	8	4	020										
09:10	020	048														175	12	005	207	38	005	9	1	005										
09:15	005	053														261	86	025	250	43	025	15	6	025										
09:40	025	078														345	84	050	345	95	050	23	8	050										
10:30	050	128														356	11	015	360	15	015	24	1	015										
10:45	015	143				0	0	000	0	0	000	0	0	000	356	11	015	360	15	015	24	1	015											
10:50	005	148				4	4	005	5	5	005	2	2	005	386	30	005	394	34	005	24	0	005		0,80	1,00	0,40	6,00	6,80	0,00				
11:00	010	158				10	6	010	10	5	010	3	1	010	398	12	010	410	16	010	24	0	010		0,60	0,50	0,10	1,20	1,60	0,00				
11:10	010	168				17	7	010	16	6	010	3	0	010	416	18	010	432	22	010	24	0	010		0,70	0,60	0,00	1,80	2,20	0,00				
11:20	010	178				25	8	010	26	10	010	4	1	010	434	18	010	457	25	010	24	0	010		0,80	1,00	0,10	1,80	2,50	0,00				
11:30	010	188				28	3	010	34	8	010	5	1	010	448	14	010	479	22	010	24	0	010		0,30	0,80	0,10	1,40	2,20	0,00				
11:37	007	195				34	6	007	38	4	007	5	0	007	457	9	007	493	14	007	24	0	007		0,86	0,57	0,00	1,29	2,00	0,00				
11:50	013	208				34	0	013	38	0	013	5	0	013	474	17	013	518	25	013	24	0	013		0,00	0,00	0,00	1,31	1,92	0,00				
12:00	010	218				39	5	010	43	5	010	6	1	010	487	13	010	530	12	010	24	0	010		0,50	0,50	0,10	1,30	1,20	0,00				
12:40	040	258				542	55	040	582	52	040	24	0	040	542	55	040	582	52	040	24	0	040					1,37	1,30	0,00				
13:00	020	278				563	21	020	603	21	020	26	2	020	603	21	020	603	21	020	26	2	020					1,05	1,05	0,10				
13:30	030	308				600	37	030	637	34	030	34	8	030	600	37	030	637	34	030	34	8	030					1,23	1,13	0,27				
14:00	030	338				629	29	030	664	27	030	39	5	030	629	29	030	664	27	030	39	5	030					0,97	0,90	0,17				
14:30	030	368				644	15	030	685	21	030	44	5	030	644	15	030	685	21	030	44	5	030					0,50	0,70	0,17				
16:00	090	458				715	71	090	817	132	090	80	36	090	715	71	090	817	132	090	80	36	090					0,79	1,47	0,40				
17:00	060	518				744	29	060	826	9	060	84	4	060	744	29	060	826	9	060	84	4	060					0,48	0,15	0,07				
18:00	060	578				792	48	060	842	16	060	87	3	060	792	48	060	842	16	060	87	3	060					0,80	0,27	0,05				
19:15	075	653				832	40	075	879	37	075	100	13	075	832	40	075	879	37	075	100	13	075					0,53	0,49	0,17				
21:00	105	758				857	25	105	919	40	105	108	8	105	857	25	105	919	40	105	108	8	105					0,24	0,38	0,08				
23:00	120	878				921	64	120	976	57	120	127	19	120	921	64	120	976	57	120	127	19	120					0,53	0,47	0,16				

Tab. 24: Messdaten Patient Nr. 04

[illegible]

Tab. 25: Messdaten Patient Nr. 05

[illegible]

Tab. 26: Messdaten Patient Nr. 06

Tab. 27: Messdaten Patient Nr. 07

Tab. 28: Messdaten Patient Nr. 08

Tab. 29: Messdaten Patient Nr. 09

Tab. 30: Messdaten Patient Nr. 10

Tab. 31: Messdaten Patient Nr. 11

Anhang

Datenblatt zur Szintigrafie von Pferden																																		
Patient Nr.	12		Umfang Widerrist (cm):					193		Länge Rumpf (cm):					64		Aktivität (GBq):					6,5		Geschlecht:		Stute		A [MBq/kg]					12,4	
Gewicht (kg):	525		Umfang Mitte (cm):					215		Länge Körper (cm):					169		Rasse:					Oldenburger		Vorstellungsgrund:		LH HR								
Größe (cm):	163		Umfang Lende (cm):					187		Referenzvolumen (dm3):					209		Alter (Jahre):					12		Art:		1/2 Szinti								
	At	t abs	MP1:			MP2:			MP3:			MP4:			MP5:			MP6:			MP7:			MP1'	MP2'	MP3'	MP4'	MP5'	MP6'	MP7'				
time	[min]	[min]	H1	H_diff1	t_diff1	H1	H_diff1	t_diff1	H2	H_diff2	t_diff2	H3	H_diff3	t_diff3	H4	H_diff4	t_diff4	H5	H_diff5	t_diff5	H5	H_diff5	t_diff5	H/t 1	H/t 2	H/t 3	H/t 4	MP5'	MP6'	MP7'				
			[μSv]	[μSv]	[min]	[μSv]	[μSv]	[min]	[μSv]	[μSv]	[min]	[μSv]	[μSv]	[min]	[μSv]	[μSv]	[min]	[μSv]	[μSv]	[min]	[μSv]	[μSv]	[min]	[μSv/min]	[μSv/min]	[μSv/min]	[μSv/min]	[μSv/min]	[μSv/min]	[μSv/min]				
08:40	000	000	0		0	000																		0,60										
08:45	005	005	3		3	005									0	0	000	0	0	000	0	0	000											
08:47	002	007																																
09:04	017	024													61	61	017	54	54	017	3	3	017								3,59	3,18	0,18	
10:07	063	087													203	142	063	182	128	063	12	9	063								2,25	2,03	0,14	
10:47	040	127					0	0	000						265	62	040	230	48	040	23	11	040								1,55	1,20	0,27	
10:56	009	136					3	3	009	0	0	000	0	0	000	276	11	009	240	10	009	26	3		009		0,33					1,22	1,11	0,33
11:06	010	146					7	4	010	4	4	010	1	1	010	287	11	010	249	9	010	28	2		010		0,40	0,40	0,10	1,10	0,90	0,20		
11:16	010	156					10	3	010	7	3	010	1	0	010	299	12	010	258	9	010	29	1		010		0,30	0,30	0,00	1,20	0,90	0,10		
11:26	010	166					16	6	010	13	6	010	1	0	010	312	13	010	268	10	010	29	0		010		0,60	0,60	0,00	1,30	1,00	0,00		
11:33	007	173					18	2	007	16	3	007	1	0	007	319	7	007	273	5	007	30	1	007		0,29	0,43	0,00	1,00	0,71	0,14			
11:59	026	199					20	2	026	18	2	026	2	1	026	348	29	026	296	23	026	36	6	026		0,08	0,08	0,04	1,12	0,88	0,23			
12:09	010	209					23	3	010	22	4	010	2	0	010	359	11	010	306	10	010	37	1	010		0,30	0,40	0,00	1,10	1,00	0,10			
12:15	006	215					24	1	006	24	2	006	3	1	006	363	4	006	309	3	006	38	1	006		0,17	0,33	0,17	0,67	0,50	0,17			
13:42	087	302													441	78	087	368	59	087	54	16	087					0,90	0,68	0,18				
15:40	118	420													527	86	118	434	66	118	72	18	118					0,73	0,56	0,15				
20:30	290	710													646	119	290	534	100	290	104	32	290					0,41	0,34	0,11				
00:15	225	935													706	60	225	579	45	225	122	18	225					0,27	0,20	0,08				
04:30	255	1190													749	43	255	620	41	255	133	11	255					0,17	0,16	0,04				
08:04	214	1404													771	22	214	636	16	214	139	6	214					0,10	0,07	0,03				

Tab. 32: Messdaten Patient Nr. 12

Datenblatt zur Szintigrafie von Pferden																																					
Patient Nr.	13		Umfang Widerrist (cm):					187		Länge Rumpf (cm):					70		Aktivität (GBq):					5,72		Geschlecht:		Stute		A [MBq/kg]					11,0				
Gewicht (kg):	522		Umfang Mitte (cm):					205		Länge Körper (cm):					187		Rasse:					WB		Vorstellungsgrund:		LH HR											
Größe (cm):	167		Umfang Lende (cm):					185		Referenzvolumen (dm3):					213		Alter (Jahre):					6		Art:		1/2 Szinti											
	Δt	t abs	MP1:			MP2:			MP3:			MP4:			MP5:			MP6:			MP7:			MP1'		MP2'		MP3'		MP4'		MP5'		MP6'		MP7'	
time	[min]	[min]	H1 [μSv]	H_diff1 [μSv]	t_diff1 [min]	H1 [μSv]	H_diff1 [μSv]	t_diff1 [min]	H2 [μSv]	H_diff2 [μSv]	t_diff2 [min]	H3 [μSv]	H_diff3 [μSv]	t_diff3 [min]	H4 [μSv]	H_diff4 [μSv]	t_diff4 [min]	H5 [μSv]	H_diff5 [μSv]	t_diff5 [min]	H5 [μSv]	H_diff5 [μSv]	t_diff5 [min]	H/t 1 [μSv/min]	H/t 2 [μSv/min]	H/t 3 [μSv/min]	H/t 4 [μSv/min]	H/t 5 [μSv/min]	H/t 5 [μSv/min]	H/t 5 [μSv/min]	H/t 5 [μSv/min]						
11:59	000	000	0	0	000										0	0	000	0	0	000	0	0	000	1,40													
12:04	005	005	7	7	005										23	23	006	20	20	006	1	1	006						3,83	3,33	0,17						
12:10	006	011													146	123	050	162	142	050	9	8	050						2,46	2,84	0,16						
13:00	050	061													261	115	070	260	98	070	34	25	070						1,64	1,40	0,36						
14:10	070	131				0	0	000	0	0	000	0	0	000	276	15	010	272	12	010	34	0	010		0,30	0,30	0,00	1,50	1,20	0,00							
14:20	010	141				3	3	010	3	3	010	0	0	010	286	10	010	281	9	010	34	0	010		0,50	0,30	0,00	1,00	0,90	0,00							
14:30	010	151				8	5	010	6	3	010	0	0	010	304	18	010	296	15	010	34	0	010		0,70	0,10	0,10	1,80	1,50	0,00							
14:40	010	161				15	7	010	7	1	010	1	1	010	314	10	010	304	8	010	34	0	010		0,40	0,20	0,00	1,00	0,80	0,00							
14:50	010	171				19	4	010	9	2	010	1	0	010	324	10	010	311	7	010	34	0	010		0,50	0,60	0,10	1,00	0,70	0,00							
15:00	010	181				24	5	010	15	6	010	2	1	010	333	9	010	319	8	010	34	0	010		0,20	0,30	0,00	0,90	0,80	0,00							
15:10	010	191				26	2	010	18	3	010	2	0	010	363	30	025	342	23	025	34	0	025		0,20	0,04	0,00	1,20	0,92	0,00							
15:35	025	216				31	5	025	19	1	025	2	0	025	370	7	010	348	6	010	35	1	010		0,30	0,00	0,10	0,70	0,60	0,10							
15:45	010	226				34	3	010	19	0	010	3	1	010	379	9	010	355	7	010	36	1	010		0,30	0,10	0,00	0,90	0,70	0,10							
15:55	010	236				37	3	010	20	1	010	3	0	010	387	8	005	361	6	005	37	1	005		0,40	0,00	0,00	1,60	1,20	0,20							
16:00	005	241				39	2	005	20	0	005	3	0	005	434	47	060	398	37	060	37	0	060					0,78	0,62	0,00							
17:00	060	301													494	60	060	448	50	060	96	59	060					1,00	0,83	0,98							
18:00	060	361													527	33	060	474	26	060	107	11	060					0,55	0,43	0,18							
19:00	060	421													559	32	060	509	35	060	118	11	060					0,53	0,58	0,18							
20:00	060	481													608	49	060	544	35	060	133	15	060					0,82	0,58	0,25							
21:00	060	541																																			

Tab. 33: Mess

Anhang

Datenblatt zur Szintigrafie von Pferden																															
Patient Nr.	18		Umfang Widerrist (cm):						Länge Rumpf (cm):						Aktivität (GBq): 7,4						Geschlecht:		Wallach		A [MBq/kg] 11,78						
Gewicht (kg):	628		Umfang Mitte (cm):						Länge Körper (cm):						Rasse: WB						Vorstellungsgrund:		LH HL								
Größe (cm):	172		Umfang Lende (cm):						Referenzvolumen (dm3): 0						Alter (Jahre): 15						Art:		1/2 Szinti								
	At	t abs	MP1:			MP2:			MP3:			MP4:			MP5:			MP6:			MP7:			MP1'	MP2'	MP3'	MP4'	MP5'	MP6'	MP7'	
time	[min]	[min]	H1	H_diff1	t_diff1	H1	H_diff1	t_diff1	H2	H_diff2	t_diff2	H3	H_diff3	t_diff3	H4	H_diff4	t_diff4	H5	H_diff5	t_diff5	H5	H_diff5	t_diff5	H/t 1	H/t 2	H/t 3	MP4'	MP5'	MP6'	MP7'	
			[µSv]	[µSv]	[min]	[µSv]	[µSv]	[min]	[µSv]	[µSv]	[min]	[µSv]	[µSv]	[min]	[µSv]	[µSv]	[min]	[µSv]	[µSv]	[min]	[µSv]	[µSv]	[min]	[µSv/min]	[µSv/min]	[µSv/min]	[µSv/min]	[µSv/min]	[µSv/min]	[µSv/min]	
08:28	000	000	0	0	000										0	0	000				0	0	000	2,86							
08:35	007	007	20	20	007										147	147	060				13	13	060					2,45		0,22	
09:35	060	067													237	90	060				20	7	060					1,50		0,12	
10:35	060	127													250	13	010				22	2	010					1,30		0,20	
10:45	010	137				0	0	000	0	0	000	0	0	000	274	24	020				26	4	020		0,40	0,30	0,15	1,20		0,20	
11:05	020	157				8	8	020	6	6	020	3	3	020	296	22	020				28	2	020		0,45	0,40	0,00	1,10		0,10	
11:25	020	177				17	9	020	14	8	020	3	0	020	322	26	025				33	5	025		0,00	0,08	0,00	1,04		0,20	
11:50	025	202				17	0	025	16	2	025	3	0	025	343	21	020				35	2	020		0,30	0,20	0,15	1,05		0,10	
12:10	020	222				23	6	020	20	4	020	6	3	020	420	77	075				60	25	075					1,03		0,33	
13:25	075	297													517	97	145				85	25	145					0,67		0,17	
15:50	145	442													534	17	010											1,70			
16:00	010	452													540	6	030											0,20			
16:30	030	482													655	115	210											0,55			
20:00	210	692													687	32	120											0,27			
22:00	120	812													722	35	119											0,29			
23:59	119	931																													
09:00	541	1472																													
																								ø dose [µSv/min]:	2,86	0,29	0,24	0,07			
																								171,43	17,25	14,70	4,50				

Tab. 38: Messdaten Patient Nr. 18

Datenblatt zur Szintigrafie von Pferden																															
Patient Nr.	19	Umfang Widerrist (cm):				196	Länge Rumpf (cm):				67	Aktivität (GBq):				8,1	Geschlecht:				Wallach					A [MBq/kg]		14,21			
Gewicht (kg):	570	Umfang Mitte (cm):				220	Länge Körper (cm):				234	Rasse:				WB	Vorstellungsgrund:				LH HL										
Größe (cm):	168	Umfang Lende (cm):				202	Referenzvolumen (dm3):				234	Alter (Jahre):				7	Art:				1/2 Szinti										
	At	t abs	MP1:			MP2:			MP3:			MP4:			MP5:			MP6:			MP7:			MP1'	MP2'	MP3'	MP4'	MP5'	MP6'	MP7'	
time	[min]		H1 [µSv]	H_diff1 [µSv]	t_diff1 [min]	H1 [µSv]	H_diff1 [µSv]	t_diff1 [min]	H2 [µSv]	H_diff2 [µSv]	t_diff2 [min]	H3 [µSv]	H_diff3 [µSv]	t_diff3 [min]	H4 [µSv]	H_diff4 [µSv]	t_diff4 [min]	H5 [µSv]	H_diff5 [µSv]	t_diff5 [min]	H5 [µSv]	H_diff5 [µSv]	t_diff5 [min]	H/t 1 [µSv/min]	H/t 2 [µSv/min]	H/t 3 [µSv/min]	H/t 4 [µSv/min]	H/t 5 [µSv/min]	H/t 5 [µSv/min]	H/t 5 [µSv/min]	
11:30	000	000	0	0	000																										
11:35	005	005	17	17	005										0	0	000				0	0	000	3,40							
12:00	025	030													99	99	025				4	4	025						3,96	0,16	
12:40	040	070													183	84	040				7	3	040						2,10	0,07	
13:30	050	120													272	89	050				18	11	050						1,78	0,22	
13:50	020	140				0	0	000	0	0	000	0	0	000	314	42	020				27	9	020						2,10	0,45	
14:05	015	155				12	12	015	4	4	015	2	2	015	332	18	015				28	1	015		0,80	0,27	0,13	1,20		0,07	
14:20	015	170				16	4	015	15	11	015	2	0	015	353	21	015				30	2	015			0,27	0,73	0,00	1,40		0,13
14:37	017	187				18	2	017	16	1	017	2	0	017	381	28	017				38	8	017			0,12	0,06	0,00	1,65		0,47
14:51	014	201				20	2	014	18	2	014	3	1	014	392	11	014				39	1	014			0,14	0,14	0,07	0,79		0,07
14:58	007	208				22	2	007	19	1	007	4	1	007	393	1	007				41	2	007			0,29	0,14	0,14	0,14		0,29
16:10	072	280													473	80	072				65	24	072						1,11	0,33	
17:17	067	347													529	56	067				83	18	067						0,84	0,27	
18:03	046	393													595	66	046				95	12	046						1,43	0,26	
19:55	112	505													637	42	112				111	16	112						0,38	0,14	
22:05	130	635													701	64	130				130	19	130						0,49	0,15	
01:50	225	860																		156	26	225							0,12		
06:50	300	1160																		180	24	300							0,08		
11:20	270	1430																		192	12	270							0,04		

Tab. 39: Messdaten Patient Nr. 19

Datenblatt zur Szintigrafie von Pferden																															
Patient Nr.	20	Umfang Widerrist (cm):				201	Länge Rumpf (cm):				75	Aktivität (GBq):				8,6	Geschlecht:				Stute				A [MBq/kg]		12,3				
Gewicht (kg):	700	Umfang Mitte (cm):				227	Länge Körper (cm):				274	Rasse:				WB	Vorstellungsgrund:				LH										
Größe (cm):	176	Umfang Lende (cm):				202	Referenzvolumen (dm3):				274	Alter (Jahre):					Art:				1/2 Szinti										
	At	t abs	MP1:			MP2:			MP3:			MP4:			MP5:			MP6:			MP7:										
time	[min]		H1 [sSv]	H_diff1 [sSv]	t_diff1 [min]	H1 [sSv]	H_diff1 [sSv]	t_diff1 [min]	H2 [sSv]	H_diff2 [sSv]	t_diff2 [min]	H3 [sSv]	H_diff3 [sSv]	t_diff3 [min]	H4 [sSv]	H_diff4 [sSv]	t_diff4 [min]	H5 [sSv]	H_diff5 [sSv]	t_diff5 [min]	H5 [sSv]	H_diff5 [sSv]	t_diff5 [min]	H1/1 [sSv/min]	H1/2 [sSv/min]	H1/3 [sSv/min]	H1/4 [sSv/min]	H1/5 [sSv/min]	H1/5 [sSv/min]	H1/5 [sSv/min]	
08:45	000	000	0	0	000										0	0	000			0	0	000		3,40							
08:50	005	005	17	17	005										122	122	030			7	7	030							4,07		0,23
09:20	030	035																													
09:50	030	065													228	106	030			13	6	030							3,53		0,20
10:50	060	125				0	0	000	0	0	000	0	0	000	341	113	060			21	8	060							1,88		0,13
11:10	020	145				8	8	020	6	6	020	1	1	020	373	32	020			21	0	020			0,40	0,30	0,05	1,60		0,00	
11:25	015	160				14	6	015	9	3	015	3	2	015	400	27	015			22	1	015			0,40	0,20	0,13	1,80		0,07	
11:55	030	190				17	3	030	9	0	030	3	0	030	443	43	030			26	4	030			0,10	0,00	0,00	1,43		0,13	
12:10	015	205				23	6	015	12	3	015	4	1	015	463	20	015			30	4	015			0,40	0,20	0,07	1,33		0,27	
13:30	080	285													564	101	080			46	16	080						1,26		0,20	
14:15	045	330													617	53	045			54	8	045						1,18		0,18	
16:30	135	465													728	111	135			78	24	135						0,82		0,18	
17:30	060	525													788	60	060			86	8	060						1,00		0,13	
19:30	120	645													843	55	120			101	15	120						0,46		0,12	
21:40	130	775													904	61	130			115	14	130						0,47		0,11	
23:45	125	900																	123	8	125									0,06	
01:45	120	1020																	130	7	120									0,06	
03:45	120	1140																	134	4	120									0,03	
05:45	120	1260																	140	6	120									0,05	
																					</										

Anhang

Tab. 40: Messdaten Patient Nr. 20

Datenblatt zur Szintigrafie von Pferden																															
Patient Nr.	21		Umfang Widerrist (cm):		--	Länge Rumpf (cm):		--	Aktivität (GBq):		8,4		Geschlecht:		Wallach		A [MBq/kg]										12,9				
Gewicht (kg):	650		Umfang Mitte (cm):		--	Länge Körper (cm):		--	Rasse:		WB		Vorstellungsgrund:		LH HR																
Größe (cm):	172		Umfang Lende (cm):		--	Referenzvolumen (dm3):		--	Alter (Jahre):		8		Art:		1/2 Szinti																
	Δt	t abs	MP1:			MP2:			MP3:			MP4:			MP5:			MP6:			MP7:			MP1'	MP2'	MP3'	MP4'	MP5'	MP6'	MP7'	
time	[min]	[min]	H1 [μSv]	H1_diff1 [μSv]	t_diff1 [min]	H1 [μSv]	H1_diff1 [μSv]	t_diff1 [min]	H2 [μSv]	H2_diff2 [μSv]	t_diff2 [min]	H3 [μSv]	H3_diff3 [μSv]	t_diff3 [min]	H4 [μSv]	H4_diff4 [μSv]	t_diff4 [min]	H5 [μSv]	H5_diff5 [μSv]	t_diff5 [min]	H5 [μSv]	H5_diff5 [μSv]	t_diff5 [min]	H/t 1 [μSv/min]	H/t 2 [μSv/min]	H/t 3 [μSv/min]	H/t 4 [μSv/min]	H/t 5 [μSv/min]	H/t 5 [μSv/min]	H/t 5 [μSv/min]	
08:41	000	000	0	0	000																			1,50							
08:45	004	004	6	6	004										0	0	000				0	0	000								
09:45	060	064													218	218	060				22	22	060					3,63		0,37	
10:15	030	094													218	0	030				22	0	030					0,00		0,00	
11:00	045	139				0	0	000	0	0	000	0	0	000	309	91	045				33	11	045					2,02		0,24	
11:15	015	154				16	16	015	15	15	015	2	2	015	396	87	015				45	12	015		1,07	1,00	0,13	5,80		0,80	
11:25	010	164				23	7	010	21	6	010	3	1	010	428	32	010								0,70	0,60	0,10	3,20			
11:45	020	184				27	4	020	24	3	020	3	0	020	447	19	020								0,20	0,15	0,00	0,95			
12:00	015	199				31	4	015	29	5	015	4	1	015	484	37	015								0,27	0,33	0,07	2,47			
12:30	030	229													497	13	030												0,43		
13:00	030	259													537	40	030												1,33		
13:30	030	289													585	48	030												1,60		
14:20	050	339													610	25	050												0,50		
17:00	160	499													650	40	160												0,25		
18:50	110	609													801	151	110												1,37		
20:40	110	719													869	68	110												0,62		
23:59	199	918																													
04:00	240	1159																													
07:00	180	1339																													
19:30	750	2089																													
07:30	720	2809																													
																					Σ dose [μSv/min]:		1,50	0,56	0,52	0,08					
																					Σ dose[μSv/h]:		90,00	33,50	31,25	4,50					

Tab. 41: Messdaten Patient Nr. 21

Datenblatt zur Szintigrafie von Pferden																															
Patient Nr.	22	Umfang Widerrist (cm):		187	Länge Rumpf (cm):		56	Aktivität (GBq):		4,8	Geschlecht:		Stute	A [MBq/kg]																10,7	
Gewicht (kg):	450	Umfang Mitte (cm):		202	Länge Körper (cm):		--	Rasse:		Dt. Reitpony	Vorstellungsgrund:		LH HR Durchtrittigkeit																		
Größe (cm):	146	Umfang Lende (cm):		195	Referenzvolumen (dm3):		172	Alter (Jahre):			Art:		3/4 Szinti																		
time	Δt	t abs	MP1:			MP2:			MP3:			MP4:			MP5:			MP6:			MP7:			MP1'	MP2'	MP3'	MP4'	MP5'	MP6'	MP7'	
	[min]	[min]	H1 [μSv]	H1_diff1 [μSv]	t_diff1 [min]	H1 [μSv]	H1_diff1 [μSv]	t_diff1 [min]	H2 [μSv]	H2_diff2 [μSv]	t_diff2 [min]	H3 [μSv]	H3_diff3 [μSv]	t_diff3 [min]	H4 [μSv]	H4_diff4 [μSv]	t_diff4 [min]	H5 [μSv]	H5_diff5 [μSv]	t_diff5 [min]	H5 [μSv]	H5_diff5 [μSv]	t_diff5 [min]	H/t 1 [μSv/min]	H/t 2 [μSv/min]	H/t 3 [μSv/min]	H/t 4 [μSv/min]	H/t 5 [μSv/min]	H/t 5 [μSv/min]	H/t 5 [μSv/min]	
09:15	000	000	0	0	000										0	0	000	0	0	000	0	0	000	2,40							
09:20	005	005	12	12	005										62	62	025	47	47	025											
09:45	025	030													132	70	035	102	55	035								2,48	1,88		
10:20	035	065													212	80	060	168	66	060	18	18	120					2,00	1,57		
11:20	060	125													231	19	015	180	12	015								1,33	1,10	0,15	
11:35	015	140				0	0	000	0	0	000	0	0	000	244	13	015	192	12	015									1,27	0,80	
11:50	015	155				8	8	015	3	3	015	3	3	015	294	50	040	233	41	040					0,53	0,20	0,20	0,87	0,80		
12:30	040	195				20	12	040	14	11	040	3	3	040	351	57	075	272	39	075								1,25	1,02		
13:45	075	270													378	27	035	291	19	035								0,76	0,52		
14:20	035	305													411	33	050	313	22	050								0,77	0,54		
15:10	050	355																										0,66	0,44		

Tab. 42: Messdaten Patient Nr. 22

Tab. 43: Messdaten Patient Nr. 23

Tab. 44: Messdaten Patient Nr. 24

Tab. 45: Messdaten Patient Nr. 25

Tab. 46: Messdaten Patient Nr. 26

Tab. 47: Messdaten Patient Nr. 27

Tab. 48: Messdaten Patient Nr. 28

Anhang

Datenblatt zur Szintigrafie von Pferden																															
Patient Nr.	29		Umfang Widerrist (cm):				--	Länge Rumpf (cm):				--	Aktivität (GBq):				8,3	Geschlecht:				Stute	A [MBq/kg]						13,6		
Gewicht (kg):	612		Umfang Mitte (cm):				--	Länge Körper (cm):				--	Rasse:				Hannoveraner	Vorstellungsgrund:				LH hi									
Größe (cm):	170		Umfang Lende (cm):				--	Referenzvolumen (dm3):				--	Alter (Jahre):				5	Art:				1/2 Szinti									
	At	t abs	MP1:			MP2:			MP3:			MP4:			MP5:			MP6:			MP7:			MP1'	MP2'	MP3'	MP4'	MP5'	MP6'	MP7'	
time	[min]	[min]	H1 [μSv]	H1_diff1 [μSv]	t_diff1 [min]	H1 [μSv]	H1_diff1 [μSv]	t_diff1 [min]	H2 [μSv]	H2_diff2 [μSv]	t_diff2 [min]	H3 [μSv]	H3_diff3 [μSv]	t_diff3 [min]	H4 [μSv]	H4_diff4 [μSv]	t_diff4 [min]	H5 [μSv]	H5_diff5 [μSv]	t_diff5 [min]	H5 [μSv]	H5_diff5 [μSv]	t_diff5 [min]	H/A1 [μSv/min]	H/A2 [μSv/min]	H/A3 [μSv/min]	H/A4 [μSv/min]	H/A5 [μSv/min]	H/A5 [μSv/min]		
08:35	000	000	0	0	000																										
08:40	009	000	14	14	005																				2,80						
08:40	000	000													0	0	000	0	0	000	0	0	000								
08:50	010	010													75	75	010	60	60	010									7,50	6,00	
08:55	005	015													94	19	005	71	11	005									3,80	2,20	
09:55	060	075													247	153	060	179	108	060									2,55	1,80	
10:45	050	125				0	0	000	0	0	000	0	0	000	359	112	050	275	96	050	32	32	125						2,24	1,92	0,26
10:55	010	135				2	2	010	2	2	010	0	0	010	373	14	010	287	12	010					0,20	0,20	0,00	1,40	1,20		
11:15	020	155				20	18	020	20	18	020	1	1	020	405	32	020	315	28	020					0,90	0,90	0,05	1,60	1,40		
11:35	020	175				31	11	020	29	9	020	2	1	020	436	31	020	341	26	020					0,55	0,45	0,05	1,55	1,30		
12:00	025	200				35	4	025	36	7	025	3	1	025	474	38	025	384	43	025					0,16	0,28	0,04	1,52	1,72		
12:27	027	227				48	13	027	40	4	027	3	0	027	507	33	027	408	24	027	43	11	102		0,48	0,15	0,00	1,22	0,89	0,11	
14:10	103	330													615	108	103	603	195	103									1,05	1,89	0,27
20:50																					112	41	400							0,10	
																					ø dose [μSv/min]:			2,80	0,46	0,40	0,03				
																					ø dose [μSv/h]:			168,00	27,50	23,74	1,68				

Tab. 49: Messdaten Patient Nr. 29

Anhang

Datenblatt zur Szintigrafie von Pferden																																								
Patient Nr.	30		Umfang Widerrist (cm):				165		Länge Rumpf (cm):				--		Aktivität (GBq):		6		Geschlecht:		Wallach						A [MBq/kg]		16,7											
Gewicht (kg):	360		Umfang Mitte (cm):				177		Länge Körper (cm):				--		Rasse:		Isländer		Vorstellungsgrund:		LH vo + hi																			
Größe (cm):	140		Umfang Lende (cm):				160		Referenzvolumen (dm3):				--		Alter (Jahre):		22		Art:		1/1 Szinti																			
	Δt	t abs	MP1: staff at dose			MP2: staff at horse front			MP3: staff at horse back			MP4: camera operator			MP5: caudal scapula horse			MP6: tuber coxae horse			MP7: holding area/box			MP1'	MP2'	MP3'	MP4'	MP5'	MP6'	MP7'										
time	[min]	[min]	H1 [μSv]	H_diff1 [μSv]	t_diff1 [min]	H1 [μSv]	H_diff1 [μSv]	t_diff1 [min]	H2 [μSv]	H_diff2 [μSv]	t_diff2 [min]	H3 [μSv]	H_diff3 [μSv]	t_diff3 [min]	H4 [μSv]	H_diff4 [μSv]	t_diff4 [min]	H5 [μSv]	H_diff5 [μSv]	t_diff5 [min]	H5 [μSv]	H_diff5 [μSv]	t_diff5 [min]	H/t 1 [μSv/min]	H/t 2 [μSv/min]	H/t 3 [μSv/min]	H/t 4 [μSv/min]	H/t 5 [μSv/min]	H/t 5 [μSv/min]	H/t 5 [μSv/min]										
08:24	000	000	0	0	000																																			
08:30	006	006	12	12	006																			2,00																
08:30	000	006													0	0	006					0	0	006					0,00	0,00										
09:00	030	036													136	136	030					9	9	036					4,53	0,25										
09:30	030	066													136	136	060					13	4	030					2,27	0,13										
10:00	030	096													232	96	030					19	6	030					3,20	0,20										
10:30	030	126													319	87	030					24	5	030					2,90	0,17										
10:40	010	136				0	0	000	0	0	000	0	0	000	410	91	010					24	0	010					9,10	0,00										
11:00	020	156				9	9	020	7	7	020	1	1	020	422	12	020					24	0	020		0,45	0,35	0,05	0,60	0,00										
11:30	030	186				23	14	030	20	13	030	5	4	030	457	35	030					24	0	030		0,47	0,43	0,13	1,17	0,00										
12:00	030	216				36	13	030	33	13	030	5	0	030	509	52	030					25	1	030		0,43	0,43	0,00	1,73	0,03										
12:30	030	246				41	5	030	39	6	030	5	0	030	570	61	030					27	2	030		0,17	0,20	0,00	2,03	0,07										
12:50	020	266				47	6	020	41	2	020	7	2	020	612	42	020					28	1	020		0,30	0,10	0,10	2,10	0,05										
13:00	010	276													635	23	010					29	1	010					2,30	0,10										
13:40	040	316													654	19	040					30	1	040					0,47	0,02										
14:30	050	366													709	55	050					38	8	050					1,10	0,16										
15:15	045	411													768	59	045					52	14	045					1,31	0,31										
19:05	230	641													815	47	230					70	18	230					0,20	0,08										
12:30	1045	1686													1.020	205	1045					118	48	1045					0,20	0,05										
22:40	610	2296																				123	5	610						0,01										
08:15	575	2871																				126	3	575						0,01										
08:15	1440	4311																				129	3	1440						0,00										
																					ø dose [μSv/min]:		2,00		ø dose [μSv/h]:		120,00		0,36		0,30		0,06							

Tab. 50: Messdaten Patient Nr. 30

Datenblatt zur Szintigrafie von Pferden																														
Patient Nr.	31	Umfang Widerrist (cm):		--	Länge Rumpf (cm):		--	Aktivität (GBq):	6,4	Geschlecht:	Stute	A [MBq/kg]		10,7																
Gewicht (kg):	600	Umfang Mitte (cm):		--	Länge Körper (cm):		--	Rasse:	Warmblut	Vorstellungsgrund:	LH hi																			
Größe (cm):	169	Umfang Lende (cm):		--	Referenzvolumen (dm3):		--	Alter (Jahre):		Art:	1/2 Szinti																			
time	Δt	t abs	MP1:			MP2:			MP3:			MP4:			MP5:			MP6:			MP7:			MP1'	MP2'	MP3'	MP4'	MP5'	MP6'	MP7'
	[min]	[min]	H1 [μSv]	H_diff1 [μSv]	t_diff1 [min]	H1 [μSv]	H_diff1 [μSv]	t_diff1 [min]	H2 [μSv]	H_diff2 [μSv]	t_diff2 [min]	H3 [μSv]	H_diff3 [μSv]	t_diff3 [min]	H4 [μSv]	H_diff4 [μSv]	t_diff4 [min]	H5 [μSv]	H_diff5 [μSv]	t_diff5 [min]	H5 [μSv]	H_diff5 [μSv]	t_diff5 [min]	H/t 1 [μSv/min]	H/t 2 [μSv/min]	H/t 3 [μSv/min]	H/t 4 [μSv/min]	H/t 5 [μSv/min]	H/t 5 [μSv/min]	
08:32	000	000	0	0	000																									
08:37	009	000	7	7	005																			1,40						
10:40	000	000				0	0	000	0	0	000	0	0	000																
12:18	098	098				38	38	098	35	35	098	5	5	098											0,39	0,36	0,05			
																								ø dose [μSv/min]:	1,40	0,39	0,36	0,05		
																								ø dose[μSv/h]:	84,00	23,27	21,43	3,06		

Tab. 51: Messdaten Patient Nr. 31

Datenblatt zur Szintigrafie von Pferden																															
Patient Nr.	32	Umfang Widerrist (cm):		--	Länge Rumpf (cm):		--	Aktivität (GBq):		6,5	Geschlecht:		Wallach	A [MBq/kg]		11,0															
Gewicht (kg):	590	Umfang Mitte (cm):		--	Länge Körper (cm):		--	Rasse:		Warmblut	Vorstellungsgrund:																				
Größe (cm):	170	Umfang Lende (cm):		--	Referenzvolumen (dm3):		--	Alter (Jahre):			Art:		1/2 Szinti																		
	At	t abs	MP1:			MP2:			MP3:			MP4:			MP5:			MP6:			MP7:			MP1'	MP2'	MP3'	MP4'	MP5'	MP6'	MP7'	
time	[min]	[min]	H1 [μSv]	H_diff1 [μSv]	t_diff1 [min]	H1 [μSv]	H_diff1 [μSv]	t_diff1 [min]	H2 [μSv]	H_diff2 [μSv]	t_diff2 [min]	H3 [μSv]	H_diff3 [μSv]	t_diff3 [min]	H4 [μSv]	H_diff4 [μSv]	t_diff4 [min]	H5 [μSv]	H_diff5 [μSv]	t_diff5 [min]	H5 [μSv]	H_diff5 [μSv]	t_diff5 [min]	H/t 1 [μSv/min]	H/t 2 [μSv/min]	H/t 3 [μSv/min]	H/t 4 [μSv/min]	H/t 5 [μSv/min]	H/t 5 [μSv/min]		
08:30	000	000	0	0	000																										
08:36	009	000	9	9	006																				1,50						
10:40	000	000				0	0	000	0	0	000	0	0	000																	
11:38	058	058				27	27	058	26	26	058	2	2	058												0,47	0,45	0,03			
																					ø dose [μSv/min]:		1,50	ø dose[μSv/h]:		90,00	0,47	0,45	0,03		
																										27,93	26,90	2,07			

Tab. 52: Messdaten Patient Nr. 32

Tab. 53: Messdaten Patient Nr. 33

Tab. 54: DL2 u. DL5 (norm.) mit Körperdaten der Patienten und der jeweiligen verabreichten Aktivität

8.4 Template der Umfrage

Strahlungsexposition des beteiligten Personals bei der Skelettszintigrafie des Pferdes mit Technetium 99- Diphosphonat

Seite 1

Wie viele Szintigrafien führen Sie /die Klinikbesatzung im Durchschnitt pro Monat durch? *

☐ 1-4

☐ 5-10

☐ 11-20

☐

Wie hoch wird Technetium 99m dosiert? *

☐ 10MBq/kg KGW

☐ > 10 Mbq/kg KGW

☐ < 10 MBq/kgKGW

☐

Tragen Sie Schutzkleidung (Handschuhe, Überziehschuhe, Overall) im Kontrollbereich? *

☐ ja

☐ nein

☐ unbekannt

☐

Werden von Mitarbeitern Bleischürzen während des Ablaufs einer Szintigrafie getragen? *

☐ ja

☐ nein

☐

Werden von Mitarbeitern Schilddrüsen-Bleiabdeckungen getragen? *

☐ ja

☐ nein

☐

Können Sie abschätzen wie hoch die Strahlungsexposition pro Ganzkörperknochenszintigrafie für einen Mitarbeiter ist? Falls Sie mit JA antworten, bitte im Textfeld unten den geschätzten Wert eingeben. *

☐ nein

☐ nein, es würde mich aber interessieren

☐ ja

☐

Bitte schätzen Sie: Wie oft kann ein Helfer bei der strahlungsintensiven Röntgenaufnahme der HWS assistieren, um um der gleichen Dosis (μSv) exponiert zu werden, wie bei das bei Assistenz während einer Ganzkörperknochenszintigrafie der Fall ist? *

Gibt es ein festes Szintigrafie-Team in Ihrer Klinik? (Gleicher Tierarzt/Pfleger/TFA) *

☐ ja

☐ nein

☐ nur minimal wechselnd

☐

Sind Personen, welche in der Szintigrafie tätig sind zusätzlich im Röntgen beschäftigt? *

☐ ja

☐ nein

☐ gelegentlich

☐

Hatten Sie in der Vergangenheit verzeichnete Arbeitsunfälle im Rahmen der Szintigrafie? *

☐ ja

☐ nein

☐ unbekannt

☐

Wie viele Bilder nehmen Sie ca. für eine Ganzkörperknochenszintigrafie auf? *

Wie viele Bilder nehmen Sie für eine Teilkörperknochenszintigrafie auf? *

Wie viele Sekunden Aufnahmezeit wählen Sie pro Bild? *

☐ 60 Sekunden

☐ 90 Sekunden

☐

Wie lange dauert bei Ihnen in etwa eine Ganzkörperknochenszintigrafie? *

☐ 1h

☐ 1,5h

☐ 2h

☐ 2,5h

☐

Wie lange dauert bei Ihnen eine Teilkörperknochenszintigrafie? *

☐ 0,5 h

☐ 1 h

☐ 1,5h

☐ 2 h

☐

Werden bei Ihnen Boxen im Kontrollbereich ausgemistet? *

☐ ja

☐ nein

☐

Welcher Kategorie gehören Mitarbeiter, welche in der Szintigrafie tätig sind, an? *

☐ Kat A (> 6mSv/Jahr)

☐ Kat B (>1 mSv/Jahr und < 6 mSv/Jahr)

☐ unbekannt

☐

Wie viel Personen sind in den Ablauf einer Szintigrafie involviert? (Aufbereitung Radioaktivität/Injektion Tc/Halter Pferd/Positionierung Pferd/Kameramann).Bitte kurze Beschreibung *

Wie lange wird der Kontrollbereich eingerichtet? *

☐ 24h

☐ 48h

☐ 72h

☐ unbekannt

☐

Wird das Pferd -falls möglich- bei Ihnen vor der Szintigrafie bewegt? *

☐ ja

☐ nein

☐

Wann verabreichen sie ein Diuretikum? *

☐ vor den Bildaufnahmen

☐ erst vor Aufnahme der Hüftknochen

☐ unbekannt

☐

Wie oft wird bei Ihnen die Weichteilphase mit aufgenommen?

☐ immer

☐ nie

☐ bei < 50%

☐ bei >50%

☐

Wie oft half die Szintigrafie bei der Ursachenfindung?

nie immer

Wie oft gehen Mitarbeiter, welche in der Szintigrafie mitarbeiten, zur ärztlichen Vorsorgeuntersuchung? *

☐ alle 6 Monate

☐ einmal jährlich

☐ alle 2 Jahre

☐ unbekannt

☐

Wie gehen Sie mit folgender Situation um: Pferd kontaminiert Untersuchungsraum mit Urin während der Aufnahme der Bilder *

☐ Späne darüber streuen

☐ noch nie vorgekommen

☐

Was sind die häufigsten Gründe zur Durchführung einer Szintigrafie? *

☐ Lahmheit der Hintergliedmaße(n)

☐ Verdacht auf Rückenerkrankung

☐ Verdacht auf Erkrankung ISG/Hüfte

☐ Mehrfach-Lahmheit

☐

Leere Seite

» [Umleitung auf Schlussseite von Umfrage Online](#) (ändern)

9 Danksagung

Mein aufrichtiger Dank gilt Herrn Prof. Dr. Dr. R. Bauer, der mir als erster Betreuer jederzeit und selbstverständlich hervorragende Unterstützung bei der Arbeit gewährte und mit unermüdlichem Elan die Fertigstellung der Arbeit vorantrieb.

Ich danke Herrn Prof. Dr. L.F. Litzke für die Überlassung dieses interessanten Dissertationsthemas, für seine gute Unterstützung, die motivierenden Worte und für das zur Verfügung gestellte Zeitkontingent zur Erstellung dieser Arbeit.

Mein Dank geht außerdem an:

- die Mitarbeiter der Klinik für Pferde (Chirurgie) in Gießen, dabei vor allem Frau Anja Serth und Frau Tierärztin Johanna Hoffmann, die ein sehr großes Interesse an meiner Arbeit zeigten und Messungen jederzeit unterstützen, Herrn Dr. Mohamad Al Naem für die Durchführung eines Hauptteils der gemessenen Szintigrafien und allen beteiligten Pflegern für das Verständnis und die Toleranz für meine Messungen,
- die Hilfe vieler freiwilliger Kollegen aus anderen Pferdekliniken; anhand Ihrer kooperativen Mitarbeit bei der Beantwortung der Umfrage, konnten aufschlussreiche Ergebnisse erhoben werden, welche als Teil in diese Dissertation einfließen,
- Herrn Dr. Failing und seiner Arbeitsgruppe Biomathematik für die Unterstützung in der statistischen Auswertung der Daten,
- sowie Herrn Dr. Preiß für die Bereitstellung zweier Dosimeter über den gesamten Messzeitraum.

Ein besonderer Dank gilt meinem lieben Papa, der mich wie selbstverständlich jederzeit bei Problemen mit der graphischen und tabellarischen Darstellung der Daten unterstützte und unendlich viel Geduld und Verständnis aufwies. Zudem möchte ich mich bei meiner Mama und meinen Freunden bedanken, die mich in schwierigen Phasen unterstützen und stets Mut zusprachen.

Ein letzter Dank gilt meiner lieben Freundin Lara! Du bist immer da für mich und ich danke Dir dafür!

10 Selbständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, die vorgelegte Dissertation selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt zu haben, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.

Theresa Sommerfeld



édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

VVB LAUFERSWEILER VERLAG
STAUFENBERGRING 15
D-35396 GIESSEN

Tel: 0641-5599888 Fax: -5599890
redaktion@doktorverlag.de
www.doktorverlag.de

ISBN: 978-3-8359-6476-1



9 17 8 3 8 3 5 19 6 4 7 6 1